

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



***Trabajo Fin de Grado***

**EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DE  
ALGORITMOS DE CONTROL DE  
CONGESTIÓN SOBRE CANALES MMWAVE**  
(Systematic evaluation of congestion control  
algorithms over mmWave channels)

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Elia Sarasúa Zubimendi

Septiembre - 2020



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por: Elia Sarasúa Zubimendi**

**Director del TFG: Luis Francisco Diez y Ramón Agüero**

**Título:** “Evaluación sistemática de algoritmos de control de congestión sobre canales mmWave”

**Title:** “Systematic evaluation of congestion control algorithms over mmWave channels “

**Presentado a examen el día:**

para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Antonio Quintela Incera

Secretario (Apellidos, Nombre): Jorge Lanza Calderón

Vocal (Apellidos, Nombre): Luis Francisco Diez

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado N°  
(a asignar por Secretaría)



### Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores del trabajo de fin de grado, Luis Francisco Díez y Ramón Agüero por la ayuda que me han brindado en todo momento. También me gustaría agradecerles a los profesores que me entendieron y animaron cuando más lo necesite.

En segundo lugar, me gustaría agradecerlo a mis compañeros de carrera. En concreto a Lucía Santamaría y a Adrián Fonseca, por ser un pilar fundamental para mí, dentro y fuera de las aulas. Y al resto del grupo, Selma, Álvaro, Patricia, Jesús, Javi, Alberto... Todos ellos han hecho de estos cuatro años los mejores. Y también, a mi grupo de amigas, Beatriz, Laura, Elena, Lucía y Sara. Por la paciencia en épocas de exámenes y por vivir mis ilusiones cómo si fuesen tuyas.

Finalmente, se lo agradezco y dedico, a mi familia por animarme cuando todo se complicó y por creer en mí y ayudarme a seguir adelante.

# Índice

<b>Lista de acrónimos</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Conceptos Teóricos</b>	<b>4</b>
2.1. Evolución de las redes celulares hacia el 5G . . . . .	4
2.2. MmWave en redes inalámbricas 5G . . . . .	6
2.3. Problemática del control de congestión en conexiones inalámbricas con mmWave . . . . .	10
2.3.1. Impacto en el control congestión . . . . .	11
2.3.2. Problemas de los protocolos de control de congestion existentes en enlaces mmWave . . . . .	13
<b>3. Herramientas</b>	<b>14</b>
3.1. Network Simulator-3 . . . . .	14
3.1.1. Módulo mmWave . . . . .	15
3.1.2. Modelo de canal . . . . .	16
3.1.3. Capa física . . . . .	16
3.2. Congestion Control Plane . . . . .	17
3.3. MahiMahi . . . . .	18
3.4. Diagrama general . . . . .	19
<b>4. Generación de trazas en NS-3</b>	<b>22</b>
4.1. SINR . . . . .	23
4.2. MCS . . . . .	25
4.3. TBSIZE . . . . .	27
<b>5. Análisis de redes</b>	<b>29</b>
5.1. Redes celulares . . . . .	30
5.2. Redes mmWave . . . . .	36
<b>6. Conclusión</b>	<b>47</b>

# Índice de Figuras

3.1. Diagrama funcional de CCP [11] . . . . .	17
3.2. Diagrama entorno de evaluación . . . . .	20
3.3. Diagrama funcionamiento parámetro IAT . . . . .	20
4.1. CDF SINR. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos. . . . .	24
4.2. CDF del índice de MCS. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos. . . . .	26
4.3. Bits recibidos. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos. . . . .	27
5.1. Evolución CWND a 50Mbps y tamaño de buffer 500K . . . . .	31
5.2. Comparación entre Verizon y ATT . . . . .	31
5.3. Operador Verizon: comportamiento estadístico de la ventana de congestión ante diferentes tasas de datos. Para cada tasa, se muestra la distribución para diferentes valores de pérdidas y tamaño del buffer. . . . .	33
5.4. Operador Verizon: Throughput medio de la comunicación para diferentes tasas de datos. Para cada tasa, se muestra la distribución para diferentes valores de pérdidas y tamaño del buffer. . . . .	34
5.5. Operador Verizon: RTT . . . . .	35
5.6. Operador Verizon: número de bytes perdidos . . . . .	35
5.7. Red mmWave: CWND para 10Mbps . . . . .	37
5.8. Red mmWave: Tasa de datos de 10Mbps . . . . .	38
5.9. Red mmWave: CWND para 50Mbps . . . . .	40
5.10. Red mmWave: Tasa de datos de 50Mbps . . . . .	41
5.11. Red mmWave: RTT para 10Mbps . . . . .	43
5.12. Red mmWave: bytes perdidos para 10Mbps . . . . .	44
5.13. Red mmWave: RTT para 50Mbps . . . . .	45
5.14. Red mmWave: bytes perdidos para 50Mbps . . . . .	46

# Índice de Tablas

2.1. Rendimiento de modelos de pérdida de penetración O2I . . . . .	8
2.2. Rango de frecuencias designado por 3GPP . . . . .	9
2.3. Bandas FR2 en el rango de frecuencias mmWave . . . . .	9

# Glosario

**1G** Primera Generación. 4

**2G** Segunda Generación. 5

**3G** Tercera Generación. 5

**3GPP** Third Generation Partnership Project. 6, 7, 9

**4G** Cuarta Generación. 6, 7, 30

**5G** Quinta Generación. 2–4, 6, 7, 9, 10, 12–14, 47, 48

**AIMD** Additive Increase Multiplicative Decrease. 3, 10, 29, 30, 47, 48

**ARP** AutoRadioPuhelin. 4

**BBR** Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time. 11

**BDP** Bandwidth-Delay Product. 10, 12, 13

**BER** Bit Error Rate. 25

**BPL** Bean Pair Link. 8

**CCP** Congestion Control Plane. 3, 14, 17, 18, 21, 29, 47

**CDF** Cumulative Distribution Function. 23, 25

**CDMA** Code-Division Multiple Access. 5

**E-GPRS** Enhanced-GPRS. 5

**E2E** End-to-End. 15

**EDGE** Enhanced Data Rates for GSM Evolution. 5

**eNB** evolved Node Base. 7, 15

**FDMA** Frequency-Division Multiple Access. 4

**GPRS** General Packet Radio Services. 5



**GSM** Global System for Mobile communications. 5

**HSDPA** High Speed Downlink Packet Access. 5

**HSUPA** High Speed Uplink Packet Access. 5

**IAT** Inter-Arrival Time. 21

**IoT** Internet of Things. 6

**LOS** Line-of-Sight. 7, 11, 13, 15

**LTE** Long-Term Evolution. 5, 6

**LTE-A** LTE-Advanced. 6

**MCS** Modulation and Coding Scheme. 3, 25, 47

**MEC** Mobile Edge Cloud. 12

**MSS** Maximum Segment Size. 10, 12

**MTU** Maximum Transmission Unit. 19, 22

**NLOS** Non-Line-of-Sight. 7, 11–13, 15

**NS-3** Network Simulator-3. 3, 14, 15, 21, 36, 47

**NYUSIM** New York University Simulator. 7–9

**OFDMA** Orthogonal Frequency-Division Multiple Access. 5

**PSS** Primary Synchronization Signal. 7

**RR** Round Robin. 12

**RTO** Retransmission Timeout. 12, 13

**RTT** Round-Trip Time. 10–12, 29, 35, 42

**SAPs** Service Access Points. 15

**SC-FDMA** Single Carrier Frequency-Division Multiple Access. 5

**SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio. 3, 23, 25, 28, 47

**TCP** Transmission Control Protocol. 3, 7, 10, 12, 13, 20, 21, 29, 31

**TDMA** Time-Division Multiple Access. 5

**UDP** User Datagram Protocol. 22

**UMTS** Universal Mobile Telecommunications Service. 5

**UTRA** UMTS Terrestrial Radio Access. 5

**WCDMA** Wideband Code Division Multiple Access. 5

**WiMax** Worldwide Interoperability for Microwave Access. 6

# Capítulo 1

## Introducción

Las comunicaciones de Quinta Generación (5G) están caracterizadas por unos requisitos que no son asequibles para tecnologías comunes. Debido a este hecho se exploraron otras tecnologías, como la basada en ondas milimétricas (millimeter wave. mmWave), que sí cumpliesen los requisitos.

Aunque la tecnología mmWave es una de las elegidas para desarrollar las comunicaciones 5G existen problemas que deben ser solucionados, estos problemas se presentan en [1]. Por ejemplo, su canal físico está caracterizado por absorber una gran cantidad de oxígeno, lo que produce difracción y pérdidas de la señal. Esto se traduce en una variación de la capacidad del canal constante.

Debido a este hecho, en la capa de transporte se interpreta la variación de canal como congestión, lo que conlleva una reducción de la tasa de datos.

Los algoritmos de control de congestión tradicionales en las capas de transporte no son óptimos. Estos algoritmos están diseñados para situaciones de pérdida debido a congestión en la red, como se desarrolla en [2]. Por ello, ante variaciones del canal inalámbrico se produce una pérdida de rendimiento y se hace un uso ineficiente de los recursos disponibles.

Para evaluar si un algoritmo de control de congestión es óptimo sobre canales mmWave, se han simulado este tipo de canales entre un transmisor y un receptor en los que un usuario se comunica con una estación base.

Si el transmisor, ante una situación de congestión en el canal, es capaz de reducir la cantidad de paquetes que puede enviar, se considerará que el funcionamiento del algoritmo de control de congestión es correcto. Esto se deberá a que es capaz de evitar una saturación en el canal y, por lo tanto, hace un uso eficiente de este.

Para lograr este cometido, los pasos que se han llevado a cabo son los siguientes:

- Utilización del simulador Network Simulator-3 (NS-3) para crear escenarios entre un usuario y una estación base mediante canales mmWave y redes móviles 5G, para la obtención de trazas que ayuden a generar un canal con estas características.
- Integración de las trazas obtenidas en el emulador de enlace MahiMahi, así como la incorporación de elementos que actúen como fuente y origen de tráfico.
- Implementación de un algoritmo clásico usado en Transmission Control Protocol (TCP) y su evaluación sobre canales tradicionales de redes celulares y mmWave.
- Integración de los componentes anteriores con la herramienta Congestion Control Plane (CCP), que permite la definición de algoritmos de control de congestión.

En conclusión, nuestro objetivo es, la mejora del control de congestión en redes móviles 5G con canales mmWave. Esto es necesario debido a que sobre TCP no existen protocolos de control óptimos que nos permitan una comunicación eficiente en redes móviles de nueva generación.

Para explicar detalladamente estos pasos se ha dividido el trabajo en diferentes capítulos que se comentarán a continuación, siendo el Capítulo 1 la introducción que se está planteando.

- Capítulo 2: Se presenta un estudio teórico en el que se analizan conceptos clave para poder comprender las comunicaciones 5G y la tecnología mmWave. En la primera parte del capítulo se expone la evolución de las redes celulares hasta alcanzar el 5G. En la segunda parte del capítulo se habla de la tecnología mmWave y se comparan los modelos de canal existentes. Finalmente, en la tercera parte, se estudia la problemática del control de congestión en conexiones mmWave.
- Capítulo 3: Se analizan las principales herramientas utilizadas. La primera herramienta que se analiza es el simulador NS-3 y el módulo mmWave utilizado para generar un canal de este tipo. La segunda herramienta es el CCP, utilizado para definir algoritmos de control de congestión. La tercera herramienta es el emulador de enlace MahiMahi que se utiliza para emular y analizar enlaces. Finalmente en este capítulo se representa mediante un diagrama la interconexión de estas herramientas.
- Capítulo 4: Se describe un escenario que, posteriormente, es introducido en el simulador NS-3. De esta simulación se obtienen las trazas que permiten generar el canal mmWave. Además, en este capítulo se analizan los parámetros que caracterizan este tipo de canales como la Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR), el Modulation and Coding Scheme (MCS) y los bytes recibidos.
- Capítulo 5: Se estudian los resultados obtenidos de implementar el algoritmo de control de congestión, Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD). En primer lugar se analizan los parámetros SINR, MCS y bytes recibidos para redes celulares tradicionales. Y en segundo lugar se analizan estos mismos parámetros para redes mmWave.

# Capítulo 2

## Conceptos Teóricos

Para la comprensión del proyecto llevado a cabo se va a realizar una explicación inicial de los conceptos teóricos clave.

Para ello, en primer lugar se comentará brevemente la evolución de las redes celulares hasta el 5G. A continuación, se hará una pequeña descripción de las particularidades de los canales mmWave, para posteriormente explicar con más detalle la problemática del control de congestión sobre este tipo de tecnología.

### 2.1. Evolución de las redes celulares hacia el 5G

Para comprender qué es el 5G se debe entender de dónde procede, esta evolución se desarrolla en [3].

Las redes móviles se dividen en generaciones, pero previamente existía una generación de redes pre-celulares. Esta generación fue llamada 0G, y su base era la utilización de portadoras analógicas que únicamente permitían una comunicación half-duplex con un rango de 20 km, es decir, se permitía la transmisión en ambas direcciones, pero no simultáneamente. Otro de sus problemas fue la baja capacidad que se poseía, solamente se disponía de 25 canales por ciudad.

En 1971 se introduce en Finlandia la tecnología AutoRadioPuhelin (ARP), teléfonos embarcados en coches, a las redes pre-celulares lo que produce el desarrollo de una nueva generación llamada 0.5G. Esta generación se implementa en la banda de 150 MHz y, además, mejora la comunicación a full-duplex, lo que permite que sea en ambos sentidos simultáneamente. También se comienzan a utilizar señales digitales para distintos tipos de mensajes de control, pero esta generación no soporta los traspasos entre estaciones base, lo cual provoca el inicio de las nuevas generaciones móviles.

La primera generación de redes móviles, Primera Generación (1G), empieza a utilizar la conmutación de circuitos para transmitir señales radio. Las llamadas de voz son moduladas a una frecuencia superior a 150 MHz y se utiliza la tecnología Frequency-Division Multiple Access (FDMA) para transmitir las señales a la red. En este caso,

continúan los problemas mencionados anteriormente con los trasposos, y se suman problemas como la carencia de seguridad en las comunicaciones y la baja calidad de conexión de las comunicaciones de voz debido a la posesión, únicamente, de una portadora por canal.

En resumen, tras la primera generación de redes móviles, solamente se soportaban llamadas de voz, y a una tasa de datos de 24 Kbps.

En la segunda generación, Segunda Generación (2G) se desarrolló el estándar Global System for Mobile communications (GSM) el cuál hoy en día es el más extendido en el mundo. En esta generación se unen voz y datos gracias a la tecnología Time-Division Multiple Access (TDMA). Se mejora la seguridad debido a la codificación de los datos que se transmiten por la red. Esta generación utiliza 8 canales con una única portadora por canal, esto permite alcanzar una tasa de datos de 13 Kbps. Como sucedió en las generaciones previas, se encuentran inconvenientes como la carencia de soporte de datos complejos.

Para mejorar el 2G, se desarrolla el 2.5G, General Packet Radio Services (GPRS), que incorpora la tecnología de conmutación de circuitos y de paquetes. Con este avance se logra incrementar la tasa de datos a valores comprendidos entre 56 Kbps y 115 Kbps. Sobre esta generación se realizan mejoras que se recogen en el 2.75G, Enhanced-GPRS (E-GPRS) o Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), que alcanza velocidades de transmisión de datos de hasta 384 Kbps.

En el año 2001 se anuncia la tecnología de Tercera Generación (3G), Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS). Esta tecnología logra una tasa de datos máxima de 8 Mbps, y, aunque su tasa para las llamadas de voz continúa siendo baja, aumenta considerablemente la tasa para llamadas de video. Se comienzan a utilizar las tecnologías Code-Division Multiple Access (CDMA) y Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), y se estandariza bajo el nombre UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA), que proporciona una eficiencia, desde el punto de vista espectral, mayor que la que se obtiene con otras tecnologías. Estos avances no evitan la retirada de esta tecnología ya que se requiere aumentar la velocidad de transmisión aún más.

Se consigue superar esta velocidad mediante las mejoras incorporadas al 3G. En el año 2003 surge la tecnología 3.5G, High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), que alcanza una velocidad de 14.4 Mbps en los enlaces descendentes. Además, ese mismo año también se desarrolla la tecnología 3.75G, High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) que produce una mejora en la velocidad del enlace de subida de hasta 5.8 Mbps.

Con la generación 3.9G, Long-Term Evolution (LTE), se logra una tasa de datos en los enlaces de subida de 50 Mbps, mediante a la utilización de Single Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) y una tasa de datos en los enlaces de bajada de 100 Mbps gracias a la tecnología Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA).

En 2010 se desarrolla la Cuarta Generación (4G), LTE-Advanced (LTE-A), que incorpora al 3.9G requisitos como la calidad de servicio o la mejora de las tasas de datos, que alcanzan los 58 Mbps en los enlaces de subida y 128 Mbps en los de bajada. Realmente, el 4G no es una tecnología en sí, sino una colección de protocolos y tecnologías que logran un rendimiento máximo. En cambio, carece de gestión de posición y de traspaso y, además, sus impulsores, LTE y Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMax), comenzaron a tener problemas de seguridad que afectaron a su correcto desarrollo. Tras surgir estos problemas, se comienza a plantear una nueva generación.

El 5G surge del aumento de usuarios y de la necesidad de estar conectados sin importar el cuándo y el dónde.

El primer impulsor de esta tecnología fue la compañía Ericsson, que logró alcanzar las velocidades requeridas, en torno a 1.2 Gbps. Posteriormente, en el año 2014, Huawei firmó un acuerdo para estandarizar y desarrollar redes 5G de prueba, pero no fue hasta el año 2019 cuando se completa la release-15 desarrollada por el Third Generation Partnership Project (3GPP).

En la release-15, [4], se recoge la primera fase del desarrollo del 5G y sus principales estándares y características, como la mejora en las comunicaciones críticas, las comunicaciones de tipo máquina y el Internet of Things (IoT). También se describen requisitos para los usos del 5G, tales como:

- **Banda ancha móvil mejorada (eMBB):** permite el acceso de banda ancha en un amplio área de cobertura. Se utiliza en ubicaciones concurridas o en transportes de alta velocidad.
- **Comunicaciones Críticas (CC) y Comunicaciones ultrafiabiles y de baja latencia (URLLC):** hay escenarios que requieren muy baja latencia, entendiendo por latencia el tiempo de transmisión de un paquete en la red, es decir, en este caso el paquete tarda en llegar al dispositivo un tiempo muy pequeño, 1 ms, simulando una conexión en tiempo real. En general, la latencia depende del retraso de la interfaz radio, la transmisión en el sistema y del procesamiento de los datos. En otros escenarios se requiere una alta disponibilidad de los servicios de comunicación, que se entiende como el requisito de una tasa de error tan baja como 1 paquete por millón.
- **Internet masivo de las cosas (mIoT):** se incluyen aspectos operativos que son aplicados a los dispositivos y servicios IoT.

## 2.2. MmWave en redes inalámbricas 5G

Para cumplir los requisitos de mayor ancho de banda, baja latencia y mayor velocidad planteados en la release-15 del 5G, se consideró utilizar las frecuencias de ondas milimétricas, mmWave.

Las comunicaciones que se realizan en esta banda de frecuencia, son una tecnología de capa física muy avanzada. Las frecuencias mmWave abarcan desde 30 GHz hasta 300 GHz, pero como se analizará posteriormente, se ha extendido a frecuencias inferiores a 6 GHz. Este tipo de comunicaciones tienen tres características esenciales:

- **Formación adaptativa y seguimiento de haces:** el transmisor y el receptor deben seguir el canal mientras el usuario se desplaza para lograr alinear las antenas y así obtener una ganancia máxima. Debido a que las ondas milimétricas son muy susceptibles a bloqueos, la estación base y el usuario tienen que realizar un procedimiento conjunto para acordar otro camino y así restablecer el enlace cuando este se haya bloqueado.
- **Sincronización direccional y canales de difusión:** las células tradicionales emiten señales de sincronización, Primary Synchronization Signal (PSS), de forma omnidireccional. En cambio, si una antena evolved Node Base (eNB) 5G mmWave emitiese esta señal de sincronización omnidireccionalmente, la señal no se beneficiaría de la ganancia direccional y no sería detectada por todos los usuarios. Por lo tanto, la eNB y el usuario deben realizar una búsqueda angular y así los usuarios podrán recibir correctamente la PSS.
- **Capas afectadas de la pila de protocolos:** al existir una rápida variación de la capacidad del canal debido a los bloqueos a los que es susceptible este tipo de enlaces, se requieren traspasos casi instantáneos entre estaciones base. Para recuperarse de un fallo en el enlace primario, se utiliza la doble conectividad, esto quiere decir que se permanece conectado tanto a una red 5G, como a una red 4G. Finalmente, en la capa de transporte, como se verá en la siguiente sección del capítulo, los algoritmos de control de congestión existentes para TCP no son óptimos, debido a que deben adaptarse rápidamente a las fluctuaciones de la capacidad para aprovechar el máximo ancho de banda, pero no deben saturar la red.

Para entender mejor la tecnología mmWave, se va a explicar una comparativa entre dos modelos de canales de banda ancha analizada en [5].

El modelo de canal propuesto por el 3GPP adapta los parámetros utilizados para frecuencias inferiores a 6 GHz y los extiende para frecuencias mmWave, superiores a 6 GHz. Se busca expresar la pérdida de trayectoria durante el primer metro de propagación para situaciones Line-of-Sight (LOS) y Non-Line-of-Sight (NLOS). Este modelo de canal no proporciona un rendimiento realista debido a que se basa en parámetros a pequeña escala (los utilizados en bandas inferiores a 6 GHz). Este hecho propicia la desaparición de la propiedad de dispersión del modelo, lo cuál provoca que no sea realista.

Por otro lado, el New York University Simulator (NYUSIM) desarrolla un modelo basado en los modelos anteriores de 6 GHz que explica, de una manera más compleja, la propagación de 6 a 100 GHz. Este modelo no se implementa sobre una base física, ni obtiene una precisión mejor, a pesar de utilizar un gran número de parámetros. Además,



se produce una discontinuidad en 6 GHz entre los modelos superiores e inferiores a esta frecuencia. El primer modelo sí solventa este hecho, es decir, carece de discontinuidad entre las frecuencias comprendidas de 500 MHz a 100 GHz.

Este modelo trata de modelar la atenuación de los edificios mediante la Ecuación 2.1. Resulta ser un modelo simple y preciso para la pérdida producida por la penetración en edificios, de exterior a interior.

$$BPL_{NYU}[dB] = 10\log_{10}(A + B * f_c^2) \quad (2.1)$$

Donde  $f_c$  está en GHz, para edificios de baja pérdida  $A = 5$  y  $B = 0.03$  y para edificios de alta pérdida  $A = 10$  y  $B = 5$ .

Por el contrario, el modelo de 3GPP utiliza un modelo Bean Pair Link (BPL) mucho más complejo como se aprecia en la Ecuación 2.2], y obtiene un resultado comparable al obtenido con el modelo BPL de NYUSIM.

$$BPL_{3GPP}[dB] = PL_{npi} - 10\log_{10} \sum_{i=1}^N \pi * 10^{\frac{L_{material_i}}{-10}} \quad (2.2)$$

Donde  $PL_{npi} = 5$  dB,  $L_{material_i}$  es la pérdida de penetración del material i,  $P_i$  es la proporción del i-ésimo material y  $N$  es el número de materiales.

Para valorar los modelos de pérdida desarrollados se ha examinado su rendimiento, el cual se muestra a continuación en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Rendimiento de modelos de pérdida de penetración O2I

		Building Penetration Loss [dB]	Standard deviation [dB]
<b>3GPP TR 38.900</b>	Low-Loss model	$5 - 10 \cdot \log_{10}(0,3 \cdot 10^{L_{glass}/10} + 0,7 \cdot 10^{L_{concrete}/10})$	4.4
	High-Loss model	$5 - 10\log_{10}(0,7 \cdot 10^{L_{IRRglass}/10} + 0,3 \cdot 10^{L_{concrete}/10})$	6.5
<b>NYU parabolic model</b>	Low-Loss model	$10\log_{10}(5 + 0,03f_c^2)$	4.0
	High-Loss model	$10\log_{10}(10 + 5f_c^2)$	6.0

Analizando estos resultados, se aprecia como los del modelo 3GPP son muy similares a los de NYUSIM siendo el primero mucho más complejo y menos realista.

En conclusión, los modelos desarrollados por 3GPP no predicen un rendimiento realista. En cambio, el modelo desarrollado por NYUSIM al basarse en modelos anteriores evita el hecho de tener que enfrentarse a problemas de depuración, que ya han sido solventados en estos modelos.

Como ya se ha mencionado en la comparación de los modelos de canal, se hace uso de dos bandas de frecuencia, la superior a 6 GHz (banda mmWave) y la inferior a esta frecuencia. En la release-15, [4], se muestra en una tabla las nuevas bandas 5G definidas [6]:

Tabla 2.2: Rango de frecuencias designado por 3GPP

Designación	Rango de Frecuencia	Rango de Frecuencia correspondiente
FR1		450 MHz - 6000 MHz
FR2-mmWave		24250 MHz - 52600 MHz

Tabla 2.3: Bandas FR2 en el rango de frecuencias mmWave

Bandas de Operación NR	Rango de Frecuencias
n257	26500 - 29500 MHz
n258	24250 - 27500 MHz
n260	37000 - 40000 MHz
n261	27500 - 28350 MHz

Como se puede observar en la Tabla [2.2], las comunicaciones mmWave utilizan rangos de frecuencia inferiores a 6 GHz. Las bandas de frecuencia que utiliza esta tecnología se recogen en la Tabla [2.3] que varían de los 24.25 GHz hasta los 52.6 GHz.

El uso de canales mmWave a altas frecuencias provoca un problema de propagación, ya que estos canales sufren grandes pérdidas a estas frecuencias. Para solventar este contratiempo se producen mejoras en la capa física, como por ejemplo el uso de antenas adaptativas inteligentes, las cuales poseen una gran cantidad de grados de libertad. Además el modelado de los canales y los distintos tipos de trabajos de medición han logrado mejorar el alcance y la cobertura de forma que sean suficientes para las redes 5G.

### 2.3. Problemática del control de congestión en conexiones inalámbricas con mmWave

Las bandas de frecuencia mmWave para las redes 5G provocan que las redes estén caracterizadas por un pico máximo de capacidad muy alto que, además, es altamente variable. Este pico surge de la gran cantidad de espectro disponible en estas bandas de frecuencia y del gran número de grados de libertad de las antenas de alta dimensión. Además, como ya se ha mencionado, los enlaces mmWave son propensos a sufrir bloqueos de hasta 35 dB de atenuación, estos bloqueos son los que provocan la variabilidad de la capacidad del enlace que puede aparecer o desaparecer.

Debido a estas características de los enlaces mmWave, se necesita entender su efecto en el protocolo de capa de transporte TCP.

En concreto se analizarán los principales algoritmos de control de congestión de dicho protocolo, entendiendo como control de congestión al servicio que regula la velocidad a la que el usuario envía paquetes a través de la red, para asegurar que se envíen suficientes paquetes para aprovechar la máxima capacidad disponible, pero no tantos como para llegar a provocar una saturación en la red.

Este trabajo se centra en la utilización de TCP como protocolo de capa de transporte, dado que es el más extendido. En [7] se exponen los principales algoritmos de control de congestión utilizados:

- **TCP NewReno** es una solución tradicional. Para analizar el comportamiento de la ventana de congestión,  $cwnd$ , es conveniente centrarse en la fase 'Congestion Avoidance', en la cual se actualiza el valor  $cwnd$  en cada recepción de un paquete ACK. Esta fase se basa en el algoritmo AIMD.

La ventana de congestión aumenta un Maximum Segment Size (MSS) cada Round-Trip Time (RTT) cada vez que recibe un paquete ACK de la forma descrita en la Ecuación [2.3]:

$$cwnd = cwnd + \alpha / cwnd \quad \text{donde: } \alpha = 1 \quad (2.3)$$

La ventana de congestión disminuye por cada paquete que se pierde según la Ecuación [2.4]:

$$cwnd = cwnd \div \beta \quad \text{donde: } \beta = 2 \quad (2.4)$$

- **HighSpeed TCP** fue diseñado para maximizar el parámetro Bandwidth-Delay Product (BDP), ya que NewReno aumentaba muy lentamente la ventana de congestión. El funcionamiento del algoritmo para tamaños de ventana de congestión pequeños, es igual que el de NewReno, pero cuando supera un valor umbral denominado threshold, los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se convierten en ecuaciones en función de  $cwnd$ .

NewReno y HighSpeed TCP dependen de los paquetes ACK que se reciben, por lo que para aumentar a mayor velocidad la  $cwnd$  bastaría con disminuir el RTT. Su disminución incrementa la frecuencia de los paquetes ACK, debido a que el valor RTT sigue la Ecuación [2.5].

$$RTT = T_{datos} + T_{ACK} \quad (2.5)$$

- **TCP CUBIC** es la implementación más extendida. Este algoritmo, al contrario de los anteriores, no depende de los paquetes ACK recibidos. Se basa en el tiempo que transcurre desde que se ha perdido el último paquete hasta el presente. Este algoritmo tiene un incremento cúbico del valor de la ventana de congestión de la forma descrita en la Ecuación [2.6].

$$cwnd(t) = C(t - K)^3 + cwnd_{MAX} \quad (2.6)$$

Siendo  $C = 0,4$  por defecto, la variable  $t$  expresa el tiempo que ha pasado desde que disminuye la  $cwnd$  hasta el presente,  $cwnd_{MAX}$  toma el valor de la  $cwnd$  en el instante en el que se pierde el paquete que hace disminuir la ventana de congestión y  $K$  es el tiempo estimado para volver a alcanzar  $cwnd_{MAX}$ , este se modela mediante la Ecuación [2.7]:

$$K = \sqrt[3]{\frac{cwnd_{MAX} \cdot \beta}{C}} \quad \text{donde: } \beta = 0,8 \quad (2.7)$$

- **TCP BBR** mide el ancho de banda de los cuellos de botella y el RTT, comprendido todo ello en la variable llamada Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time (BBR). Su funcionamiento se basa en hacer coincidir la tasa de envío con el ancho de cuello de botella medido anteriormente.

### 2.3.1. Impacto en el control congestión

A modo de ejemplo, a continuación se comentan los principales resultados obtenidos en [7], en los que se evaluó el rendimiento de algoritmos de control de congestión sobre canales mmWave.

El primer escenario consiste en un tren que viaja a 108 km/h, este siempre se encuentra en situación LOS debido a la realización de los traspasos entre estaciones base a gran velocidad. Se utiliza un esquema de rastreo de canales y movilidad para dispositivos doblemente conectados, a estaciones base de frecuencias mmWave y estaciones base de frecuencias inferiores a 6 GHz. Es decir, en este escenario, el canal varía rápidamente.

El segundo escenario cuenta con una estación base a 25 metros de altura. En este escenario se encuentran 10 usuarios moviéndose a velocidad de peatón: 4 usuarios se encuentran en situación LOS, otros 4 en NLOS y los 2 últimos en el interior de un edificio. En este caso, el canal se puede considerar estable respecto al tiempo.

Además se utiliza en cada escenario dos tipos de servidores. En primer lugar se utiliza un servidor alojado en un centro de datos remotos, el cual produce un  $RTT = 40$  ms. En segundo lugar se utiliza un escenario Mobile Edge Cloud (MEC) en el cual el servidor se aloja cerca de la estación base con una latencia mucho menor que en el anterior caso, 4 ms.

En las simulaciones que se han realizado en [7] se utiliza un buffer en saturación con la opción TCP SACK activa y la opción TCP delayed ACK deshabilitada. Esta primera opción permite al receptor, ante la pérdida de múltiples paquetes, alertar al transmisor de cuáles son los que han sido recibidos correctamente, lo que mejora el rendimiento del sistema de retransmisión. La deshabilitación de la segunda opción obliga a recibir un paquete ACK por cada paquete de datos enviado. Además, estas simulaciones utilizan un tiempo Retransmission Timeout (RTO) mínimo de 200 ms.

En el primer escenario se produce un mayor impacto con el servidor alojado en la base de datos remota. El algoritmo TCP BBR obtiene los mejores resultados respecto al rendimiento mediante la utilización de un buffer de gran tamaño, 14 KB, sin embargo este rendimiento sigue siendo insuficiente para redes 5G.

Si se utiliza un buffer de menor tamaño (1.4 KB) el algoritmo TCP BBR sigue obteniendo el mejor resultado respecto al rendimiento, siendo su latencia similar a la de los algoritmos TCP basados en pérdidas.

Los algoritmos de control de congestión de TCP basados en pérdidas no logran ajustar la  $cwnd$  lo suficientemente rápido, por lo que su funcionamiento obtiene peores resultados que los obtenidos con TCP BBR. Entre estos algoritmos el que obtiene mejores resultados es HighSpeed TCP debido al rápido crecimiento de la  $cwnd$  en la región BDP. Por otro lado, CUBIC funciona mejor que NewReno en el caso del servidor remoto, pero tiene un peor funcionamiento con el servidor alojado en la estación base. Esto se debe a que el algoritmo CUBIC no depende del número de paquetes ACK recibidos, por lo tanto, es más fiable en los enlaces en los que el RTT es alto.

En el segundo escenario las estaciones base utilizan una programación Round Robin (RR) por lo que la gestión de los recursos de la estación no tienen impacto en los flujos de datos. Además, se considera un valor de MSS de 1400 Bytes y un tamaño de buffer de 1.5 MB para cada usuario.

Todos los algoritmos obtienen un promedio de rendimiento por célula y un rendimiento entre usuarios similar. En cambio, el valor RTT varía enormemente entre los distintos algoritmos debido a que este parámetro depende de las condiciones del canal y de la latencia de la red.

Los algoritmos con un incremento de  $cwnd$  más drástico, CUBIC y HighSpeed, provocan un incremento de la latencia en los usuarios en situación NLOS y en los que están en el interior de un edificio. En cambio, el algoritmo TCP BBR, limita la  $cwnd$  al

doble de la estimada en la región BDP. Esto provoca que la latencia máxima tome el valor de la Ecuación [2.8]:

$$Latencia_{max} = 2 \cdot RTT_{min} \quad (2.8)$$

### 2.3.2. Problemas de los protocolos de control de congestion existentes en enlaces mmWave

Tras exponer los distintos escenarios y sus impactos finales en los protocolos de control de congestión analizados anteriormente, es necesario explicar los problemas que surgen tras estos análisis y que se desarrollan en [8].

El principal problema es la necesidad de varios segundos, por parte de los algoritmos de control de congestión de TCP, en la fase 'Slow Start' para lograr un rendimiento máximo de los enlaces mmWave. Este problema surge de la gran velocidad de los datos en las redes 5G mmWave. En concreto, este problema afecta directamente a las aplicaciones que dependen de conexiones TCP de corto alcance.

El segundo problema observado es la gran disminución de la tasa de datos en las transiciones entre situaciones LOS a NLOS. Esta disminución de la tasa de datos provoca que surjan grandes colas y que se saturen los buffers. A su vez, estos hechos causan un aumento de la latencia, el cual es perjudicial para la tecnología 5G.

En tercer lugar, tras un RTO, incluso los protocolos de TCP más drásticos, como lo es CUBIC, necesitan una gran cantidad de tiempo para volver a funcionar a pleno rendimiento.

De estos problemas, se puede sacar en conclusión que los algoritmos de control de congestión existentes para el protocolo TCP no son eficientes para redes inalámbricas 5G con enlaces mmWave. Por todo ello, es necesario diseñar nuevas soluciones que puedan ser evaluadas de forma sistemática.

# Capítulo 3

## Herramientas

En este capítulo se van a describir las herramientas que se han empleado para la implementación del entorno de evaluación de algoritmos de control de congestión.

- En primer lugar se utiliza el simulador de redes NS-3, donde se creará una conexión entre un usuario y una estación base en un escenario realista a fin de obtener trazas del canal subyacente.
- En segundo lugar se ha utilizado el CCP para realizar una configuración dinámica de la ventana de congestión basándose en un algoritmo de control de congestión.
- En tercer lugar se ha generado un canal mediante el emulador MahiMahi con el intercambio de mensajes obtenido en el primer punto. Este canal se generará entre el usuario y el receptor.
- Finalmente, se ha integrado una librería basada en Netfilter que permite alterar las cabeceras de información de los segmentos de datos. Esta solución se ha añadido para poder evaluar soluciones que precisen que el transmisor use información que solo tenga el receptor.

Se mostrará un diagrama general para un mejor entendimiento del proyecto realizado.

### 3.1. Network Simulator-3

Para obtener una emulación realista del canal mmWave de las redes 5G se ha utilizado el simulador NS-3. La elección de este simulador se debe a que es una plataforma de código abierto que implementa un gran número de protocolos en C++. Lo cual es muy útil para realizar un diseño y análisis de capas cruzadas.

En concreto se ha utilizado un modelo basado en mmWave diseñado por la Universidad de Nueva York y la Universidad de Padova, el cual nos permite evaluar el rendimiento de las capas. Este modelo se presenta en [9] y se basa en la arquitectura del modelo LTE LENA.

La herramienta NS-3 permite evaluar el impacto del canal y de la tecnología de capa física en toda la pila de protocolos. Para realizar un correcto funcionamiento se debe tener en cuenta el comportamiento de los principales elementos involucrados en el sistema:

- **Modelo de canal:** es un elemento fundamental. En este caso, el modelo mmWave, mencionado anteriormente, afecta al rendimiento End-to-End (E2E) debido a las condiciones de propagación de los enlaces de este tipo. Por lo tanto, se ha de valorar cuándo el usuario se encuentra en una situación LOS o NLOS para analizar las pérdidas de propagación o la posible variación de la capacidad del canal.
- **Movilidad de los usuarios y despliegue de la red:** Estos elementos afectan al rendimiento de la comunicación. Las células mmWave poseen muy poco alcance, por ello, su despliegue será muy denso y requerirá actualizaciones de los puntos de acceso. Se debe llevar a cabo una simulación para conseguir el mayor realismo posible.
- **Modelado de la pila de protocolos de los enlaces mmWave y dispositivos finales:** un modelo simplificado de la pila de protocolos puede ser preciso para estudios sin interacción compleja, pero no lo es para la generación de resultados realistas cuando se realiza una interacción entre las distintas capas de la pila de protocolos.

### 3.1.1. Módulo mmWave

El módulo mmWave aprovecha la implementación de los protocolos LTE ya existentes, e implementa nuevas capas PHY y MAC.

Para comprender la interacción de las clases en este módulo, se van a mencionar las más características, por ejemplo, las clases *MmWaveEnbNetDevice* y *MmWaveUeNetDevice* representan la pila de protocolos de la eNB y del usuario respectivamente. Además, se incluye la clase *McUeNetDevice* la cual representa un dispositivo que posee una doble conectividad, es decir, es capaz de conectarse a la red LTE y mmWave.

Las clases *MmWaveEnbMac* y *MmWaveUeMac* implementan los Service Access Points (SAPs) del proveedor y los interfaces de usuario del módulo LTE, lo cual permite la interoperabilidad con la capa LTE RLC. Esta interoperabilidad proporciona un soporte para los distintos modos existentes: transparente (TM), de saturación (SM), de reconocimiento (AM) y no reconocido (UM).

La clase *MmWavePhy* gestiona la transmisión y recepción de los canales de control y de datos en sentido ascendente y descendente. De manera similar al módulo LTE, cada instancia de capa física se comunica sobre el canal, *SpectrumChannel*, a través de la clase *MmWaveSpectrumPhy*.



Las funciones de alto nivel son similares a las descritas en el módulo LTE LENA explicado en [10].

### 3.1.2. Modelo de canal

El módulo mmWave proporciona tres modelos de canal: *3GPP Statical Channel Model*, *Ray-Tracing or Measurement Trace Model* y el que se ha utilizado en este proyecto, *NYU Statical Model*.

El modelo *NYU Statical Model* está basado en trazas generadas previamente en Matlab, lo que disminuye la carga computacional, pero solo se puede utilizar en frecuencias comprendidas entre 28 GHz y 73 GHz. En este modelo de canal se proponen dos modelos de pérdidas: *MmWavePropagationLossModel* y *BuildingObstaclePropagationLossModel*.

Este canal posee dos características esenciales, su configuración y un método semi-empírico para la transición entre los estados LOS/NLOS. Respecto a la configuración del canal, como ya se ha mencionado, Matlab se encarga de ciertos cálculos, como las matrices de los canales y los vectores de generación de haces, puesto que estos no dependen de la distancia entre el usuario y la estación base y, por lo tanto, pueden ser generados con anterioridad. Sobre la transición entre los estados LOS/NLOS se puede modelar de manera semi-empírica, es decir, se superpone un canal estático con mediciones de bloqueo realizadas en un laboratorio.

En los tres modelos de canal el cálculo de la interferencia se realiza mediante un esquema que valora los vectores generadores de haces asociados a cada enlace.

La Ecuación 4.1 calcula la interferencia producida por una estación base, BS2, en una conexión entre un usuario, UE1, y otra estación base, BS1.

$$SINR_{11} = \frac{\frac{P_{Tx,11}}{PL_{11}} \cdot G_{11}}{\frac{P_{Tx,22}}{PL_{21}} \cdot G_{21} + BW \times N_0} \quad (3.1)$$

Donde  $P_{Tx,ii}$  es la potencia de transmisión de la  $eNB_i$ ,  $PL_{ij}$  es la pérdida entre  $eNB_i$  y  $UE_j$  y  $BW \times N_0$  es el ruido térmico.

### 3.1.3. Capa física

En el módulo mmWave se propone una estructura de trama mmWave que permite una asignación más flexible de los canales de control y de datos en una subtrama. En este módulo, además, se recoge la implementación de un modelo de error y un modelo HARQ basados en los modelos existentes en LENA, haciéndolos compatibles con el módulo desarrollado.

Existen similitudes con las tramas y subtramas ya propuestas en LTE, como por ejemplo, la división de las tramas en subtramas de longitud fija. En cambio, en el módulo mmWave propuesto, se puede especificar la longitud de la subtrama siempre que sea un múltiplo de un símbolo OFDM.

Por ejemplo, una trama de longitud 1 ms puede dividirse en 10 subtramas de una duración cada una de 100  $\mu$ s, lo que representa 24 símbolos de 4.16  $\mu$ s de duración. En esta propuesta, el control de canales descendente o ascendente se fija en el primer y último símbolo de la subtrama respectivamente. Se utiliza un periodo de guarda de 1 símbolo para realizar un intercambio en el sentido de la comunicación. En el dominio de la frecuencia una banda de 1 GHz se divide en 72 subbandas de 13.89 MHz que contienen 48 subportadoras.

## 3.2. Congestion Control Plane

El plano de control de congestión es una plataforma utilizada para la compartición y desarrollo de algoritmos de control de congestión, los cuales son independientes de la ruta de datos.

CCP está basado en la independencia de la lógica de control de congestión de la ruta de datos, lo cual proporciona una ganancia de capacidad de programación. El algoritmo de control de congestión se reubica entre la ruta de datos y un agente de espacio de usuario. La Figura 3.1 muestra un diagrama funcional de la herramienta CCP.

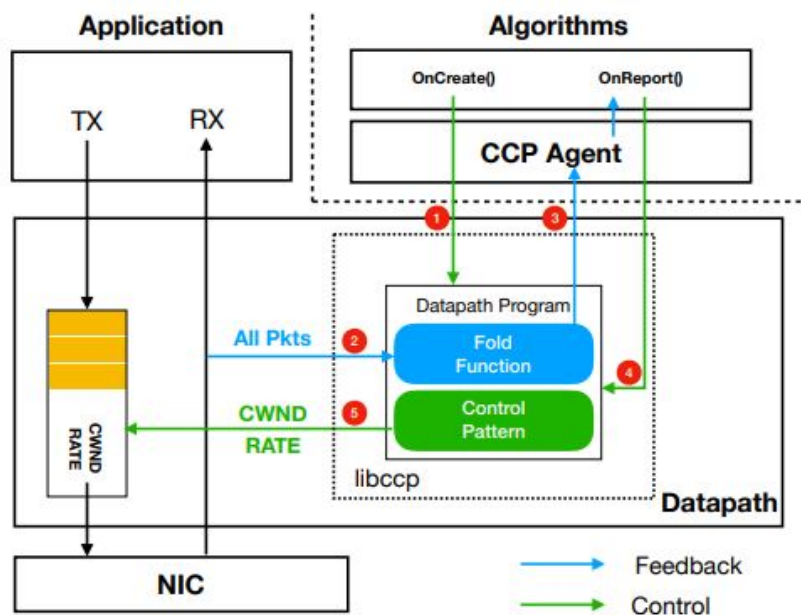


Figura 3.1: Diagrama funcional de CCP [11]

El programa de ruta de datos analiza cada paquete ACK, recopila estadísticas e informa periódicamente al agente de espacio de usuario. Este agente debe tomar una decisión basada en la información recibida en el paquete ACK. Los programas de ruta de datos, llamados también datapath, son controlados por eventos ejecutados en cada flujo individual. Estos programas poseen la siguiente estructura: un bloque único en el que se definen las variables, un bloque de eventos y otro de controladores de dichos eventos.

Al ejecutar el algoritmo de control de congestión en el módulo CCP, situado fuera de la ruta de datos, existen los siguientes beneficios:

- **Escrito una vez, ejecutado en cualquier parte:** es posible ejecutar el algoritmo en cualquier ruta de datos que sea capaz de soportar la interfaz especificada.
- **Mayor ritmo de desarrollo:** se puede obviar la estructura de datos del programa datapath.
- **Nuevas capacidades:** control agregado de múltiples flujos y algoritmos de computación sofisticada.

En cambio, si el algoritmo de control de congestión se ejecuta en el mismo espacio de direccionamiento que el programa datapath, existen distintos factores conflictivos:

- **Seguridad:** los programas que implementan estos algoritmos son considerados no fiables. Esto se debe a que al situarse en el mismo espacio de direccionamiento se pueden provocar errores en el código o en la librería y pueden causar caídas en la ruta de datos.
- **Flexibilidad:** el hecho de situar el algoritmo de control de congestión fuera del programa datapath proporciona flexibilidad.
- **Actuación:** los algoritmos pueden acceder a las mediciones sobre la congestión de la ruta de datos con un valor de retardo muy pequeño y un alto rendimiento al situarse en el mismo espacio de direccionamiento.

La herramienta CCP está implementada en C como un módulo del kernel de Linux. A su vez, existen librerías en lenguajes de programación RUST y Python para usarlo. Finalmente, cabe destacar que la herramienta *iperf* puede ser configurada para interactuar con CCP.

### 3.3. MahiMahi

MahiMahi es un conjunto de herramientas de espacio de usuario utilizadas para la emulación y el análisis de las redes. Estas herramientas pueden utilizarse para emular distintos efectos en la red, uno tras otro. Para realizar esta concatenación de efectos se anida un contenedor MahiMahi dentro de otro. Cada herramienta posee un comando para su ejecución, por lo tanto, se pueden anidar los contenedores desde la línea de comandos. MahiMahi se presenta en [12].

Las distintas herramientas de emulación de un enlace son las siguientes:

- **DelayShell**: los paquetes que entran o salen del contenedor sufren un retardo descrito en el comando, en milisegundos.
- **LossShell**: los paquetes que entran o salen del contenedor se pierden a una velocidad dada en el comando, entre 0 y 1.
- **LinkShell**: utiliza archivos de traza de entrega de paquetes en los cuales cada línea representa la oportunidad de entrega de un paquete de tamaño Maximum Transmission Unit (MTU). Además, permite emular enlaces que varían en el tiempo. Cada paquete que llega al enlace, se coloca en una de las dos colas de paquetes dependiendo de su dirección, ascendente o descendente.

MahiMahi posee tres características que la distinguen de otros emuladores de enlace, las cuales se analizan en [12].

- **Precisión**: MahiMahi es una herramienta cuidadosa a la hora de emular multiservidores de aplicaciones web, esta característica es clave para una mejor precisión de los tiempos de carga de las páginas web.
- **Aislamiento**: se consigue aislar el tráfico MahiMahi del tráfico del resto del sistema, lo que permite que haya múltiples instancias que funcionen en paralelo sin que haya interferencias entre ellas.
- **Composición y extensibilidad**: posee una estructura en forma de celdas UNIX, lo cual permite al usuario la ejecución de ficheros sin modificar la celda. La herramienta *RecordShell* permite registrar el tráfico HTTP para cualquier proceso. *ReplayShell* reproduce este contenido utilizando servidores locales que simulan ser servidores de aplicación. Además se utilizan las herramientas de emulación de enlace mencionadas anteriormente.

En nuestro caso se hará uso, principalmente, del comando *LinkShell* que nos permite usar trazas de sistemas celulares para definir las oportunidades de entrega de paquetes.

### 3.4. Diagrama general

A continuación, en la Figura 3.2, se muestra un diagrama general del entorno de evaluación en el que se muestra la integración de los componentes previamente descritos y el funcionamiento global. Asimismo, se describe el papel que juega la librería basada en Netfilter, que no ha sido descrita por separado al no tratarse de una herramienta como tal.

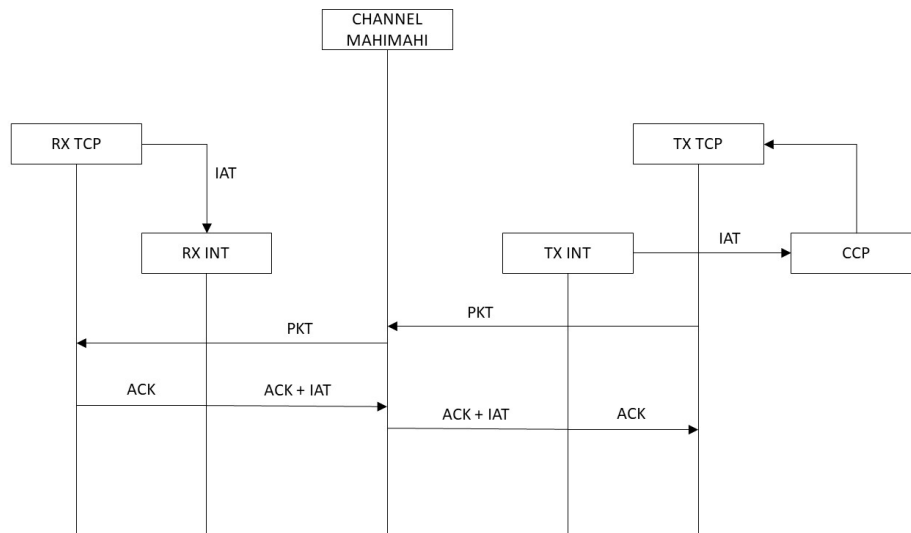


Figura 3.2: Diagrama entorno de evaluación

Desde un punto de vista general, el entorno consiste en una comunicación entre un transmisor (TX) y un receptor (RX) TCP a través de un canal implementado con MahiMahi. Además, existe una pareja de transmisor y receptor intermedios que se han denominado TX/RX INT.

Esta pareja de entidades intermedias hace uso de la librería NetFilter para alterar el contenido de los segmentos de datos. A su vez, esto nos permite enviar información desde el receptor al transmisor que podría ser usada por alguna solución de nivel de congestión. En concreto, la implementación actual envía el tiempo entre llegadas de paquetes consecutivos (inter-arrival-time IAT).

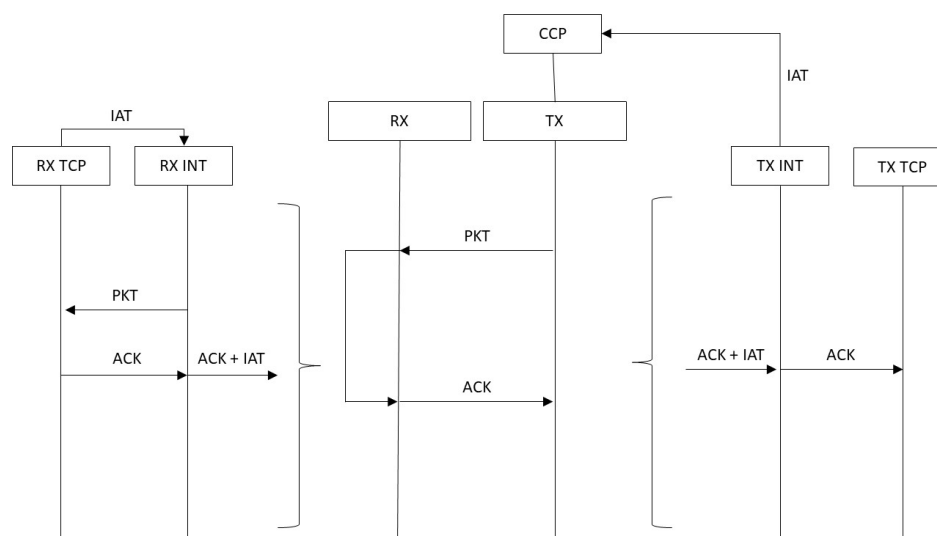


Figura 3.3: Diagrama funcionamiento parámetro IAT

Como se muestra en la Figura 3.3 cuando el receptor va a enviar un ACK, antes de ser enviado pasa por la entidad RX-INT. Entonces esta entidad incluye la información que

se precisa (IAT en nuestro caso) y recalcula el checksum de la cabecera del protocolo IP. Como se puede observar en la Figura 3.3 existe una comunicación entre el receptor TCP y la entidad RX-INT que se realiza mediante programación multihilo para evitar que afecte a la transmisión.

Del mismo modo, una vez que el segmento ACK se recibe, este pasa por la entidad TX-INT que recoge la información añadida y recompone la cabecera IP. Finalmente, esta información, el Inter-Arrival Time (IAT) concretamente, se envía a una cola. De este modo, en algoritmo de control de congestión que necesitara esta información podría subscribirse a la cola para usarla. Aunque esta lógica está integrada en la solución final y se ha validado su funcionamiento, cabe indicar que en los resultados que se mostrarán en el siguiente capítulo no se ha hecho uso de ella, ya que el algoritmo implementado no precisa de información existente en el receptor.

Volviendo al diagrama general de la Figura 3.2, el canal através del cual se comunican los distintos dispositivos se genera mediante la herramienta MahiMahi en la cual se introducen las trazas creadas en el simulador NS-3. Aunque el trabajo se enmarca en el estudio de control de congestión sobre canales mmWave, el entorno desarrollado permitiría evaluar cualquier tipo de canal, únicamente reemplazando las trazas.

Una vez integradas todas las herramientas, el entorno de emulación funcionaría como sigue. En primer lugar, el TX envía un paquete de datos llega al RX original, el cual informa al RX-INT del IAT.

En segundo lugar, el RX envía la confirmación de recepción del paquete la cual es interceptada por el RX-INT que incluye en su cabecera el valor IAT registrado anteriormente. Este paquete, ACK + IAT, llega hasta el TX-INT que extrae el valor que se ha incluido previamente en la cabecera y envía el paquete de confirmación original al TX.

El TX-INT una vez obtiene el valor IAT lo envía al CCP que mediante un algoritmo de control de congestión calcula dinámicamente la ventana de congestión del TX.

# Capítulo 4

## Generación de trazas en NS-3

En este capítulo se describe el escenario implementado para la simulación de una comunicación entre un usuario y una estación base. Además, se analizarán los parámetros que caracterizan el canal mmWave, así como la interacción de estos parámetros con otras métricas obtenidas en otras capas de la pila de protocolos. Aunque el escenario generado es sencillo, este puede ser extendido una vez que la generación de los parámetros de análisis, así como de la generación de trazas para insertar en el entorno descrito, han sido implementadas.

El escenario a simular cuenta con una estación base y un solo usuario. La estación base está situada en el punto de coordenadas (0,0) y a 10 metros de altura respecto del suelo. El usuario es un usuario estático, por lo tanto permanece en la misma posición durante toda la simulación, pero para poder analizar correctamente las variaciones del canal se han realizado varias simulaciones con distintas posiciones de este. Es decir, el usuario se sitúa en el punto de coordenadas (distancia,0), donde distancia toma como valor inicial 10 metros y en cada simulación aumenta en 10 metros esta separación hasta alcanzar una distancia máxima de 50 metros respecto de la estación base.

En cada realización del escenario, el usuario se comunica con un servidor de datos que envía tráfico usando el protocolo User Datagram Protocol (UDP). El objetivo de usar este protocolo es obtener una traza que represente la capacidad bruta de la comunicación a nivel de transporte, que posteriormente alimente a la herramienta MahiMahi. Si por el contrario se usara un protocolo que implementara una solución de control de congestión, la traza resultante se vería afectada por este algoritmo.

Para una correcta comunicación entre los extremos de la comunicación se crea un enlace punto a punto que comunica la red de acceso con el servidor de tráfico.

El enlace punto a punto se ha configurado con una capacidad de 100 Gbps, y tamaño de la MTU, 1500 Bytes. Además se ha añadido un pequeño retardo que sufren los paquetes al viajar por este,  $100\mu s$ . Dada la alta capacidad del enlace se asegura que la comunicación a nivel de transporte únicamente se vea afectada por la red de acceso inalámbrica.

Además, se modifica la tasa de datos a la que se comunican el usuario y servidor, desde 10 Mbps hasta 50 Mbps, con un paso de 10 Mbps.

Para realizar un análisis sobre la comunicación se han obtenido tres parámetros principales:

- **SINR**: mide la calidad de una conexión inalámbrica. Este parámetro se describe según la Ecuación [4.1].

$$SINR = \frac{P_{signal}}{P_{noise} + P_{interf}} \quad (4.1)$$

- **MCS**: indica la velocidad de transmisión de los datos en un enlace, pero no el rendimiento real utilizable. Este parámetro resume el número de flujos espaciales, el tipo de modulación y la velocidad de codificación que se puede lograr al conectarse a un punto de acceso.
- **TBSIZE**: representa los bits recibidos totales por cada milisegundo. Este parámetro en concreto es el que se utilizará como traza en el entorno final de evaluación, ya que es la información requerida por MahiMahi.

A continuación se analizará el comportamiento de cada uno de los parámetros en las diferentes configuraciones del escenario.

## 4.1. SINR

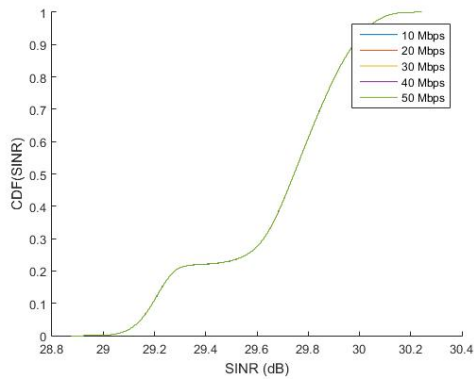
Para analizar el parámetro SINR se ha calculado la Cumulative Distribution Function (CDF) para cada distancia a la que se encuentra el usuario de la estación base y para las distintas tasas de datos establecidas. Los resultados se muestran en la Figura 4.1.

Como era de esperar, se puede observar que en ninguna de las figuras el valor de la CDF SINR depende de la tasa de datos a la que se envían los paquetes. En cambio, si que se observa una diferencia importante de las distancias de 10 y 20 metros del resto.

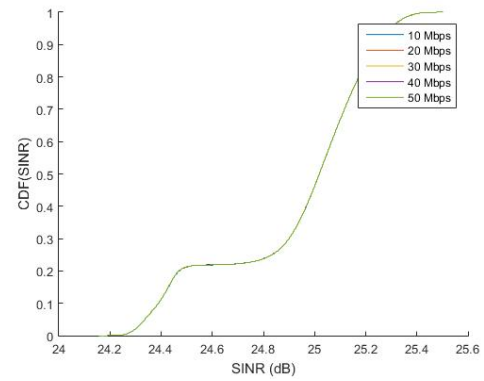
Para 10 y 20 metros, la SINR es superior a 20 dB, llegando a alcanzar incluso los 30 dB en el caso de la Figura 4.1a, la cual se corresponde a la distancia de 10 metros. Por lo tanto, la señal para estas distancias es excelente con velocidades de datos máximas.

En cambio, para el resto de distancias se observa que este valor disminuye hasta oscilar entre los 0 dB y los 13 dB, lo que significa que la intensidad de la señal es pobre. Es posible lograr velocidades confiables, pero se pueden tener datos marginales con abandonos. Además, cuando la SINR disminuye hasta los 0 dB se produce una disminución de rendimiento severa.

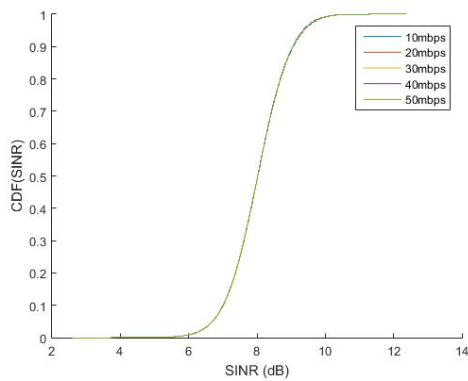




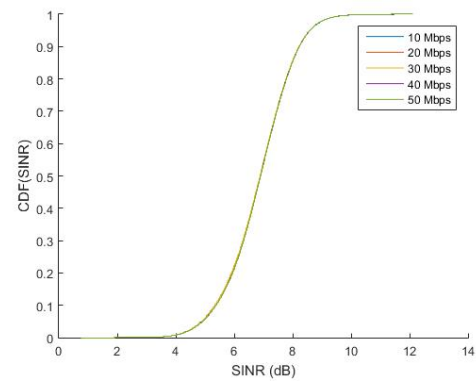
(a) CDF SINR distancia 10 metros



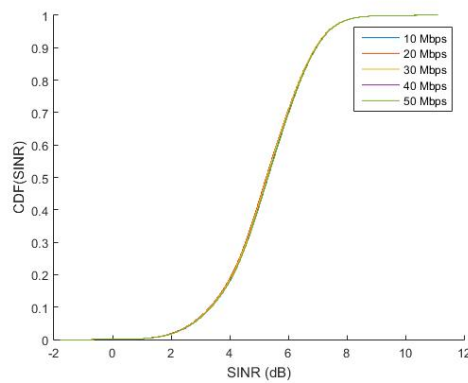
(b) CDF SINR distancia 20 metros



(c) CDF SINR distancia 30 metros



(d) CDF SINR distancia 40 metros



(e) CDF SINR distancia 50 metros

Figura 4.1: CDF SINR. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos.

## 4.2. MCS

El parámetro MCS representa el esquema de técnicas de modulación y codificación seleccionado, selección que se realiza internamente de la forma más adecuada según las condiciones del canal radio en cada instante de tiempo. En este sentido, la MCS se adecuará a la calidad del enlace de manera dinámica.

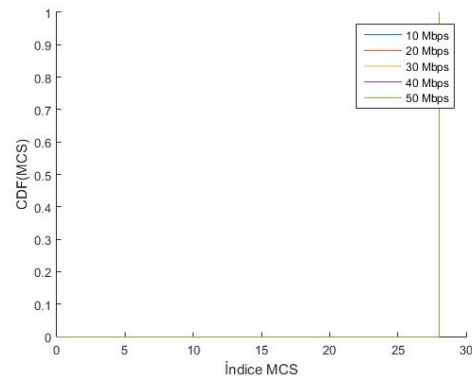
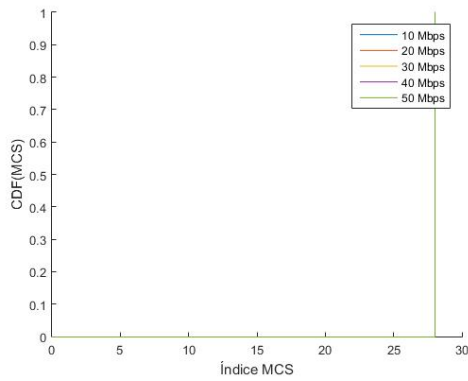
A los canales con mejores calidades se les asignan valores de MCS más eficaces, altos, que permiten tasas de transmisión más elevadas. En cambio, a los canales con peor calidad los valores de MCS que se fijan son más robustos y provocan que la tasa de transmisión sea inferior.

Estos esquemas de modulación y codificación se caracterizan por la tasa de error de bit, Bit Error Rate (BER), frente a la SINR. Además cada codificación de canal posee una BER específica.

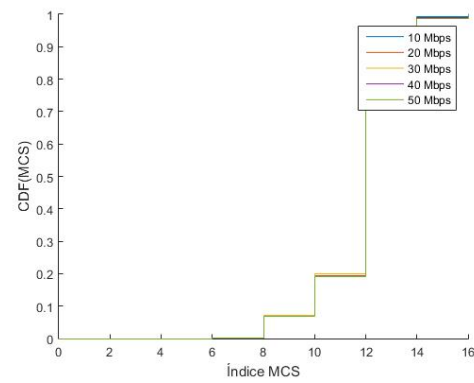
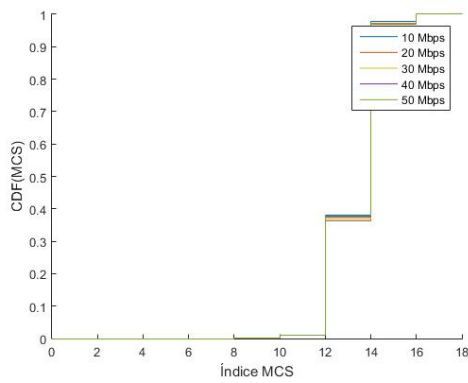
Por lo tanto, el valor MCS representa la cantidad de datos que se pueden enviar a la vez, a mayor índice MCS más datos se pueden enviar en la transmisión. En la Figura 4.2 se muestra la CDF de los índices de MCS obtenidos en cada configuración del escenario.

Se puede observar como a medida que la SINR disminuye, la MAC escoge un nivel más bajo de MCS para que los datos sean codificados correctamente.

Para 10 y 20 metros, el valor SINR toma valores máximos,  $> 20\text{dB}$ , por lo tanto, la MCS para estas distancias alcanza un valor entorno a 27, que es el índice máximo obtenido y se corresponde con una modulación 64 QAM con poca sobrecarga de codificación. En cambio para 50 metros, la SINR no supera los  $13\text{dB}$ , lo cual provoca una disminución considerable del valor MCS que varía entre 4 y 14. Para las distancias intermedias este valor es similar al obtenido con 50 metros, debido a que los valores SINR también se sitúan en un rango aproximado.

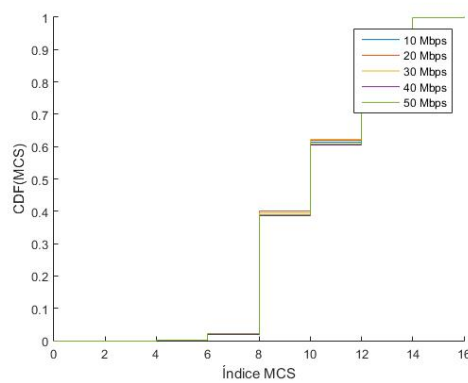


(a) CDF del índice de MCS distancia 10 metros (b) CDF del índice de MCS distancia 20 metros



(c) CDF del índice de MCS distancia 30 metros

(d) CDF del índice de MCS distancia 40 metros

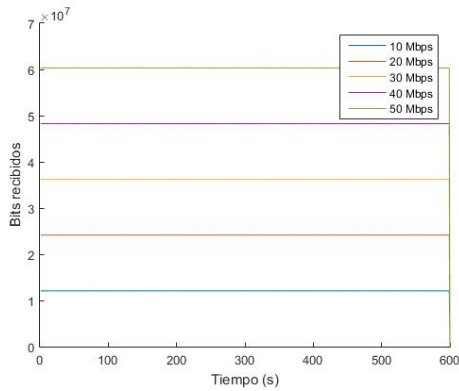


(e) CDF del índice de MCS distancia 50 metros

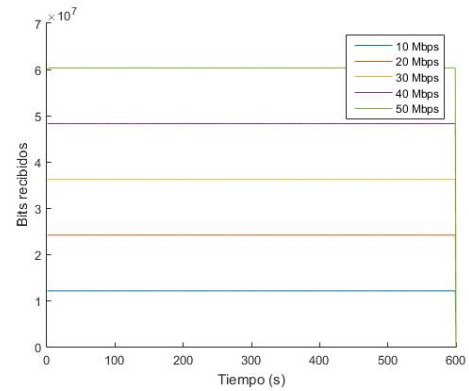
Figura 4.2: CDF del índice de MCS. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos.

### 4.3. TBSIZE

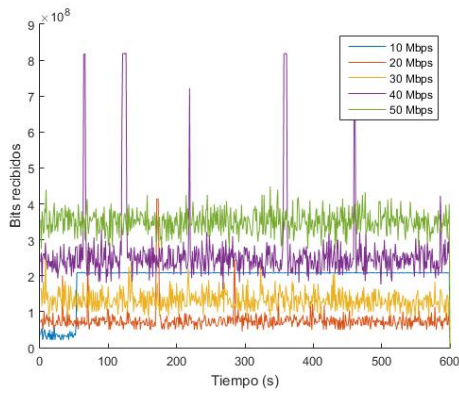
En la Figura 4.3 se muestran los bits recibidos por cada milisegundo para las distintas distancias y tasas de datos simuladas. En este caso, en lugar de un análisis estadístico, se muestra la evolución temporal de una realización de cada configuración.



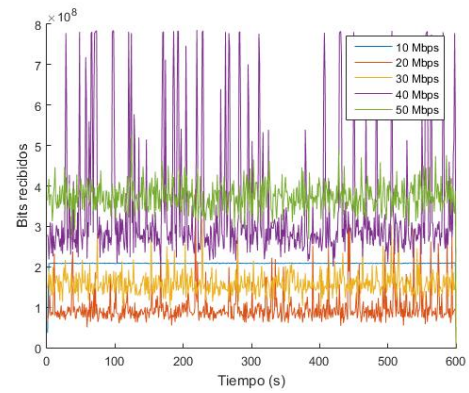
(a) Bits recibidos distancia 10 metros



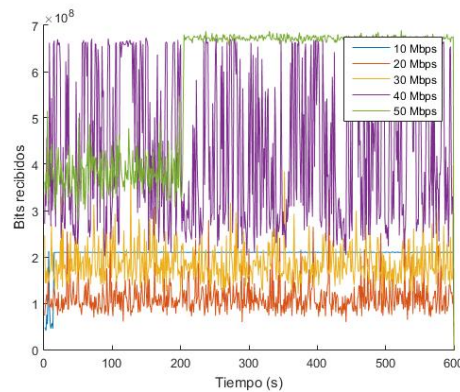
(b) Bits recibidos distancia 20 metros



(c) Bits recibidos distancia 30 metros



(d) Bits recibidos distancia 40 metros



(e) Bits recibidos distancia 50 metros

Figura 4.3: Bits recibidos. En cada una de las figuras se muestran los valores obtenidos para una distancia fija y diferentes tasas de datos.

Se puede observar cómo en las Figuras 4.3a y 4.3b, correspondientes a 10 y 20 metros de distancia entre el usuario y la estación base, los bits recibidos para cada tasa son constantes y alcanzan el mismo valor en ambas gráficas. Esta linealidad se corresponde con el análisis anterior del parámetro SINR, el cual, para estas distancias, es superior a 20 dB. Este hecho implica que la tasa de datos a la que se envían los paquetes es máxima y por lo tanto, no varía la calidad del enlace.

Para las gráficas correspondientes a parámetros SINR inferiores a 13 dB, el número de bits recibidos a lo largo del tiempo varía constantemente. En la Figura 4.3e se observa una variación del número de bits recibidos para las tasas de datos de 40 Mbps y 50 Mbps. Esto se debe a que a 50 metros el parámetro SINR es inferior al obtenido para el resto de distancias, llegando a valer 0 dB, lo cual causa esta gran oscilación en los bits recibidos. Además se pueden ver comportamientos poco previsibles, como tasas brutas mayores para tasas de aplicación menores. En concreto en las figuras con distancias mayores de 20 metros, se puede apreciar que, a lo largo del tiempo, la tasa bruta obtenida para tráfico a 10 Mbps es mayor que la que se corresponde con tráfico de 20 o 30 Mbps. Este efecto probablemente se deba a retransmisiones provocadas por la baja calidad de los enlaces.

# Capítulo 5

## Análisis de redes

En este capítulo se va a validar el entorno completo de evaluación de algoritmos de control de congestión. Para ello se implementará un algoritmo de control de congestión ampliamente usado, AIMD, en CCP y se estudiará su comportamiento ante diferentes canales inalámbricos, incluyendo los obtenidos en mmWave. El objetivo de este análisis es validar el funcionamiento del entorno integrado de evaluación sistemática y la obtención de estadísticas.

Para entender los resultados finales es necesario conocer el funcionamiento interno del algoritmo de control de congestión AIMD, el cual es comunmente usado por el protocolo TCP. Se produce un aumento de la ventana de congestión de manera lineal al recibir un ACK y se reduce exponencialmente su tamaño al detectar congestión en la red.

En concreto, la ventana aumentará  $\frac{1}{cwnd}$  por cada ACK recibido, es decir, se aumenta un paquete cada RTT y se reduce a la mitad cada vez que se detecta una pérdida. Esto se especifica en el Algoritmo 1, en el apartado *on\_report*, implementado en el CCP.

---

**Algoritmo 1** AIMD

---

```
1: procedure AIMD
2:   def on_report(self, r) :
3:     if r.loss > 0 or r.sacked > 0 then
4:       self.cwnd /= 2
5:     else
6:       self.cwnd += self.datapath_info.mss*(r.acked/self.cwnd)
7:     end if
8:     self.cwnd = max(self.cwnd, self.init_cwnd)
9: end procedure
```

---

Para realizar la simulación del canal se va a utilizar la herramienta Mahimahi presentada en el Capítulo 3. Como se ha comentado con anterioridad, esta herramienta posee diferentes comandos que permiten realizar una modificación de las características del canal.

En primer lugar se ha utilizado el comando *mm-loss* para especificar el porcentaje de pérdida que indica a la velocidad que se van a perder los paquetes en el canal, los valores que se han utilizado son: 0 %, 1 %, 2 % y 5 %.

En segundo lugar, se ha variado el tamaño de buffer, mediante el comando *-downlink-queue-args*, para provocar tres tipos de situaciones. Con un tamaño de buffer pequeño, 100 KBytes, se produce congestión, la cual provoca una disminución del rendimiento. Para un tamaño de buffer intermedio, 500 KBytes, el número de paquetes que se pierden disminuye respecto a la situación anterior, pero siguen existiendo pérdidas. Y finalmente se utiliza un tamaño de buffer mayor, 1 MByte, para el cual no se pierde ningún paquete debido a esta característica.

Finalmente, mediante el comando *mm-link* se introducen trazas para que la orden de envío de paquetes se dé según los valores de oportunidad de transmisión que almacenan dichos ficheros. Para simular redes celulares se seleccionan unas trazas estándar de distintos operadores y para simular redes mmWave se utilizan las trazas generadas en el Capítulo 4.

## 5.1. Redes celulares

Para reproducir un canal característico de redes celulares se han utilizado las trazas de dos operadores, Verizon y ATT, obtenidas para comunicaciones 4G. Cabe indicar que estas trazas están incluidas dentro de la propia implementación de MahiMahi. En todos los resultados que se muestran a continuación se ha emulado el canal durante 600 segundos.

La utilización del algoritmo AIMD produce la siguiente evolución de la ventana de congestión que se puede observar en la Figura 5.1. Estos valores se han obtenido de la simulación realizada mediante las trazas de Verizon, con un tamaño de buffer de 500 KBytes y para tres porcentajes de pérdida distintos. No se ha utilizado el porcentaje de pérdida del 0 % debido a que al no perderse ningún byte, la ventana solo aumenta.

El parámetro CWND aumenta linealmente en el tiempo como se ha descrito en el algoritmo. Este aumento se produce mientras se reciben paquetes ACK y no se pierde ningún paquete. Debido a esto, los valores obtenidos de una simulación con un porcentaje de pérdida inferior alcanzan valores de cwnd superiores. Para el caso del 5 % de pérdida la ventana de congestión no supera el valor  $2 \times 10^4$  bytes, esto se debe a que se pierden bytes con mayor frecuencia que en el resto de porcentajes.

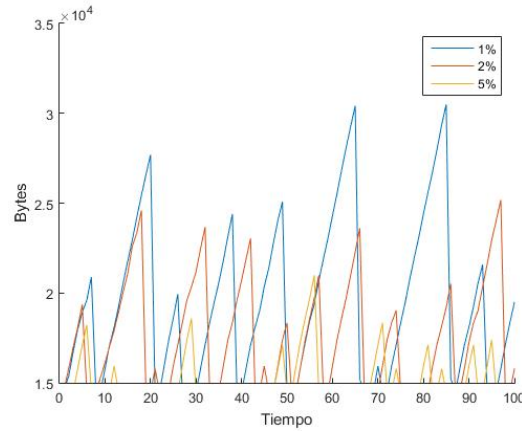
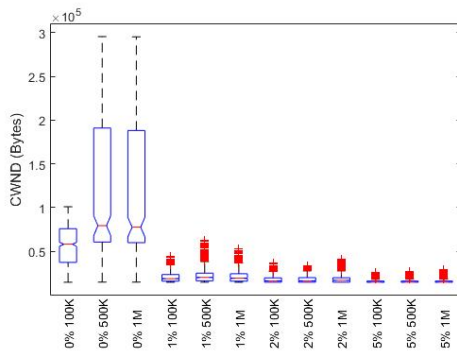
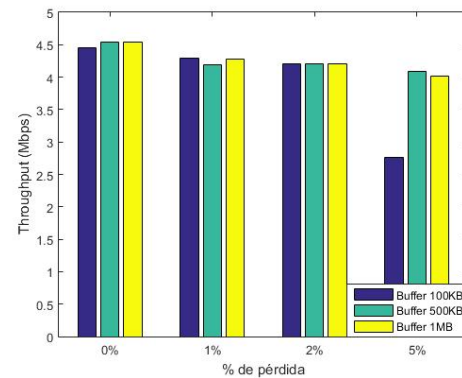


Figura 5.1: Evolución CWND a 50Mbps y tamaño de buffer 500K

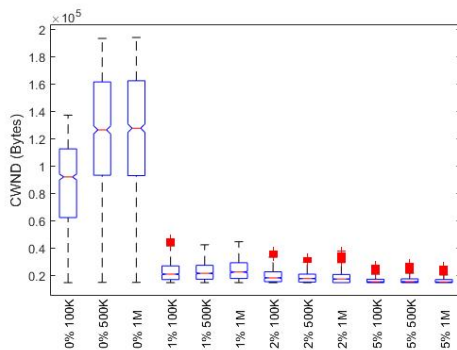
A continuación la Figura 5.2 muestra el comportamiento estadístico de la ventana de congestión, así como el rendimiento de la comunicación para las diferentes configuraciones. Los resultados de estos parámetros para cada operador difieren, por lo tanto, se puede apreciar que los distintos tipos de redes celulares afectan al rendimiento interno del protocolo TCP.



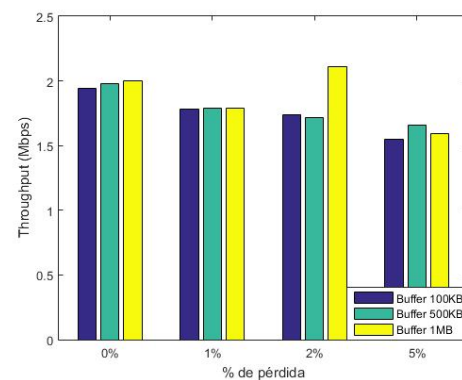
(a) Verizon: CWND para 10Mbps



(b) Verizon: Tasa de datos de 10Mbps



(c) ATT: CWND para 10Mbps



(d) ATT: Tasa de datos de 10Mbps

Figura 5.2: Comparación entre Verizon y ATT

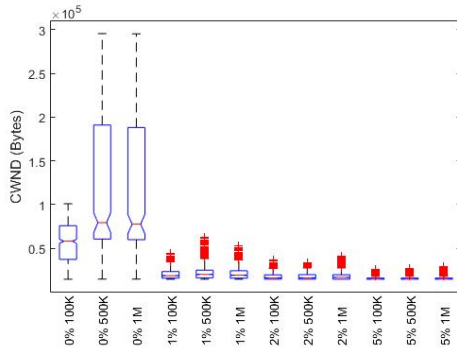


En concreto se puede observar cómo para las trazas del operador Verizon el rendimiento a 10 Mbps es muy superior al obtenido para las trazas del operador ATT para esta misma tasa. Debido a este hecho, se ha seleccionado al operador Verizon para realizar un análisis más detallado de los parámetros analizados ante diferentes tasas de datos.

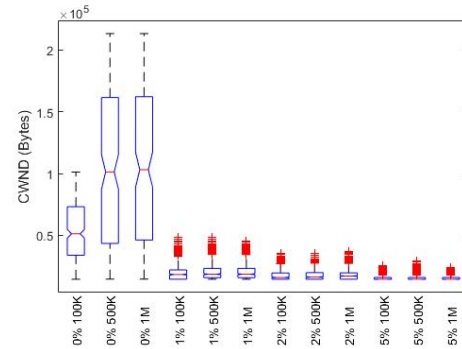
En la Figura 5.3 se muestra la distribución de la ventana de congestión para diferentes tasas, y variando tanto la tasa de pérdidas como el tamaño del buffer de MahiMahi. En primer lugar se puede observar que la evolución de la ventana de congestión se ve claramente afectada por el porcentaje de pérdida. Para un porcentaje del 0 % se produce un aumento considerable de este valor, en cambio, a medida que este porcentaje aumenta el valor que alcanza este parámetro disminuye.

Esta evolución también depende de la tasa de datos asignada al canal. Para una velocidad de 10 Mbps la ventana de congestión alcanza, para el 0 % de pérdida, valores más altos que los alcanzados para tasas superiores, tomando los valores más bajos para la tasa de 50 Mbps.

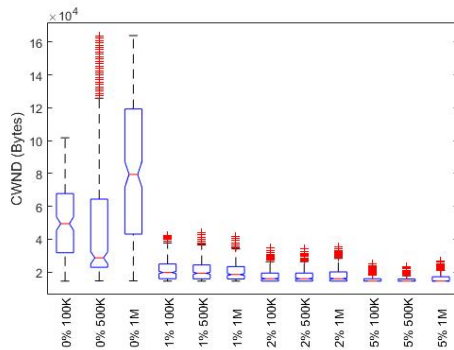
En la Figura 5.4 se muestra el rendimiento medio (throughput) ante las diferentes tasas de datos, y variando tanto el porcentaje de pérdida como el tamaño del buffer. Por lo general, el rendimiento para el tamaño de buffer de 1 MByte y el 0 % de porcentaje de pérdida es superior al obtenido para el resto de combinaciones. En concreto, para la tasa de datos de 50 Mbps y para el tamaño de buffer y el porcentaje de pérdida mencionados, se logra un rendimiento de aproximadamente 5 Mbps, mientras que para el resto de tasas se obtiene un valor inferior.



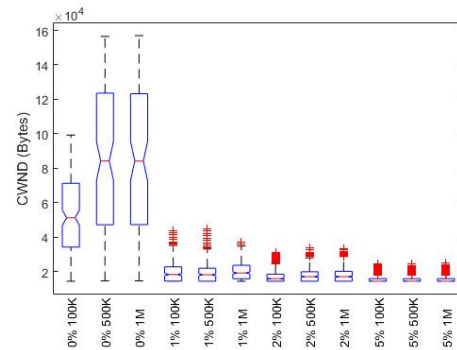
(a) CWND a 10Mbps



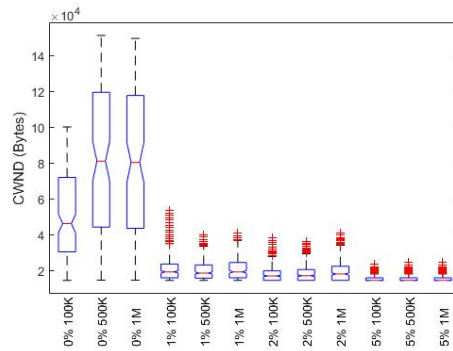
(b) CWND a 20Mbps



(c) CWND a 30Mbps

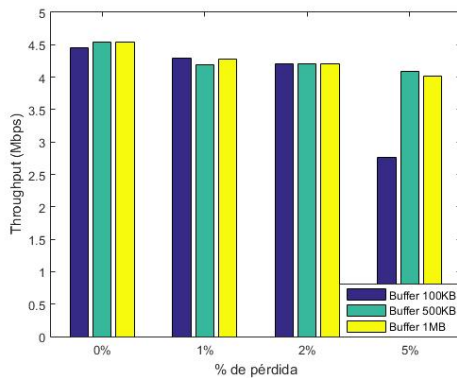


(d) CWND a 40Mbps

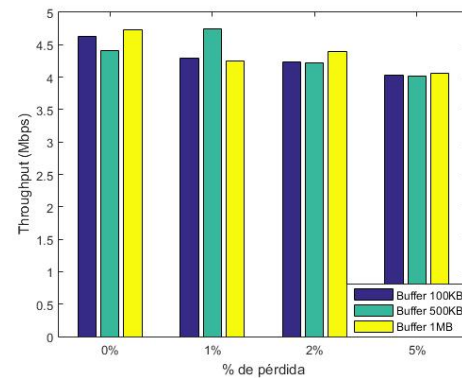


(e) CWND a 50Mbps

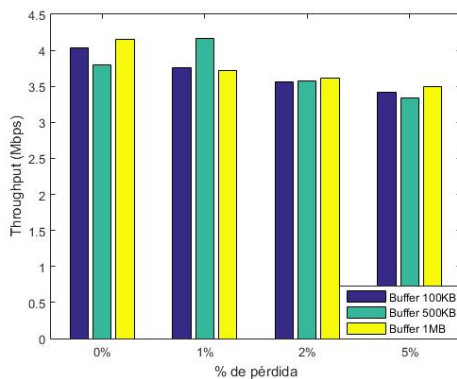
Figura 5.3: Operador Verizon: comportamiento estadístico de la ventana de congestión ante diferentes tasas de datos. Para cada tasa, se muestra la distribución para diferentes valores de pérdidas y tamaño del buffer.



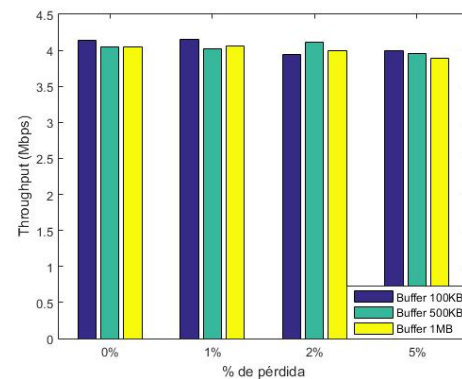
(a) Tasa de datos de 10Mbps



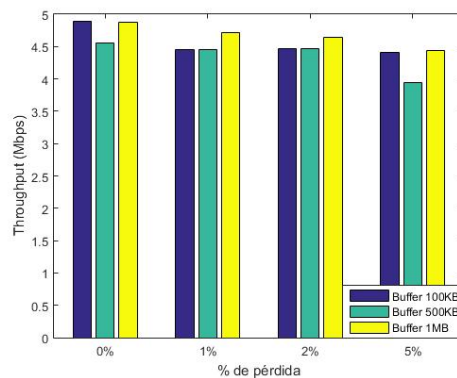
(b) Tasa de datos de 20Mbps



(c) Tasa de datos de 30Mbps



(d) Tasa de datos de 40Mbps



(e) Tasa de datos de 50Mbps

Figura 5.4: Operador Verizon: Throughput medio de la comunicación para diferentes tasas de datos. Para cada tasa, se muestra la distribución para diferentes valores de pérdidas y tamaño del buffer.

Como se ha observado, para los parámetros analizados en las figuras anteriores, en general, se sigue el mismo patrón. Por ello, en las métricas que se muestran a continuación únicamente se analizarán los casos de tasas de 10 y 50 Mbps.

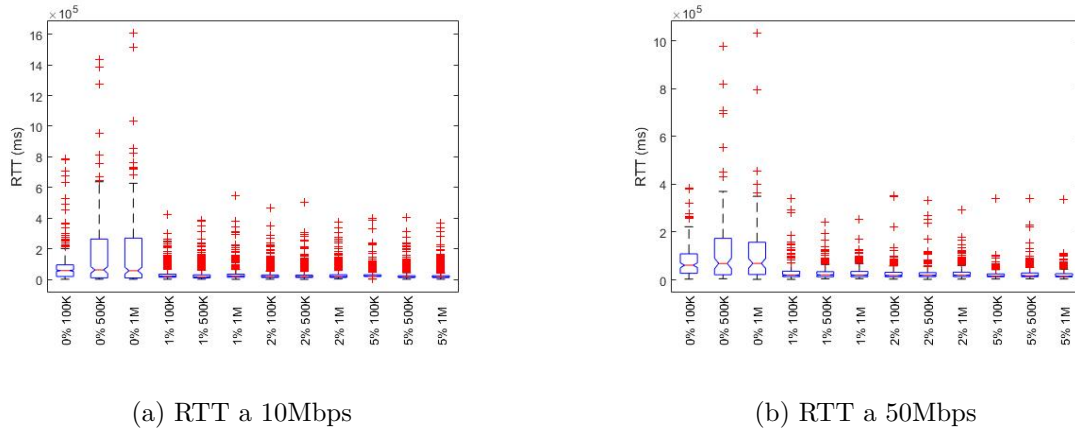


Figura 5.5: Operador Verizon: RTT

El parámetro RTT indica la diferencia de tiempo entre la emisión de un paquete y la recepción de su correspondiente confirmación. En la Figura 5.5 se demuestra cómo el parámetro a analizar no depende de la tasa de datos, viéndose afectado principalmente por el porcentaje de pérdidas.

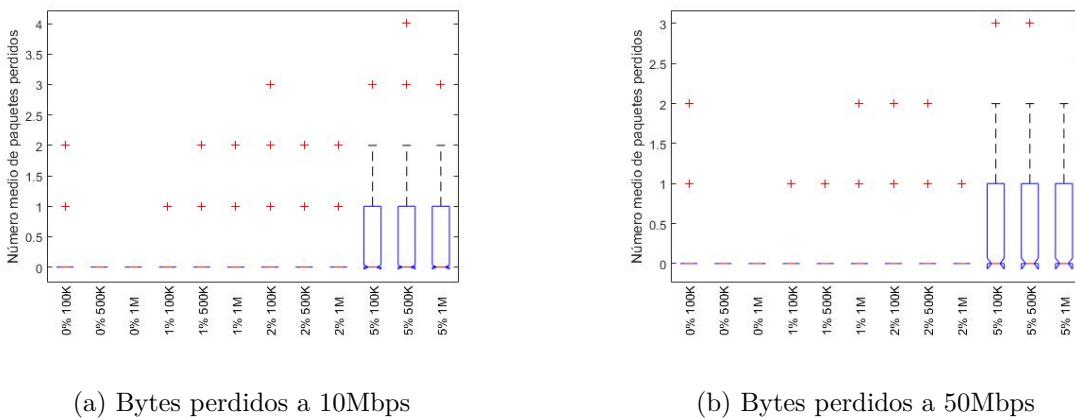


Figura 5.6: Operador Verizon: número de bytes perdidos

Finalmente, en la Figura 5.6 se muestra el número de segmentos perdidos a nivel de transporte. Este parámetro es similar para ambas tasas de datos y además, se observa cómo para el porcentaje de pérdida del 5% de media se pierden 2 paquetes, mientras que para el resto de porcentajes solo se pierden paquetes de manera esporádica.

## 5.2. Redes mmWave

Para realizar la simulación de una red mmWave, se han incluido en la herramienta Mahimahi las trazas generadas en el simulador NS-3.

En el análisis previo de los parámetros de redes celulares se ha observado que la evolución de estos sigue un patrón. Por lo tanto, para este tipo de red únicamente se realizará un análisis de los parámetros para las tasas de datos de 10 Mbps y 50 Mbps. Además, para las redes mmWave existe otra característica a tener en cuenta, la distancia entre el usuario y la estación base.

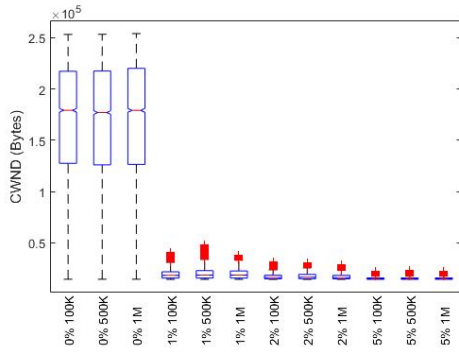
En primer lugar se va a analizar la evolución de la ventana de congestión y el rendimiento para las distintas tasas de datos y distancias.

La Figura 5.7 muestra la evolución de la ventana de congestión. Esta evolución alcanza el valor pico,  $2,5 \times 10^5$  Bytes, para el porcentaje de pérdida del 0 %. En cambio, para el resto de porcentajes, al sufrirse pérdidas, la ventana de congestión apenas aumenta.

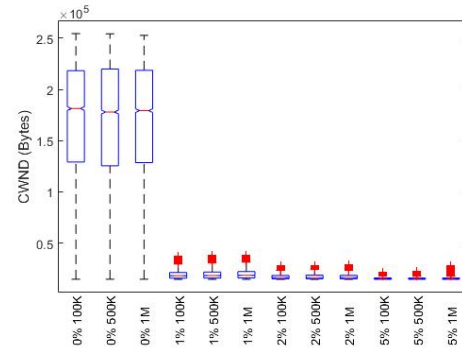
El rendimiento del canal se presenta en la Figura 5.8, en la cual se observa cómo este disminuye al aumentar el porcentaje de pérdida. Para el 0 % de pérdida se logra un valor de rendimiento óptimo, 3.5 Mbps, por el contrario, para el 5 % este valor oscila entorno a los 3 Mbps.

Por lo general, el rendimiento para el tamaño de buffer de 1 MByte es ligeramente superior que para los demás tamaños de buffer. Esta diferencia es mínima en este caso debido a que para una tasa de datos tan baja el buffer no llega a saturarse en ninguna de las situaciones. A medida que la tasa de datos aumente veremos cómo aumenta la diferencia de rendimiento entre los distintos tamaños de buffer seleccionados.

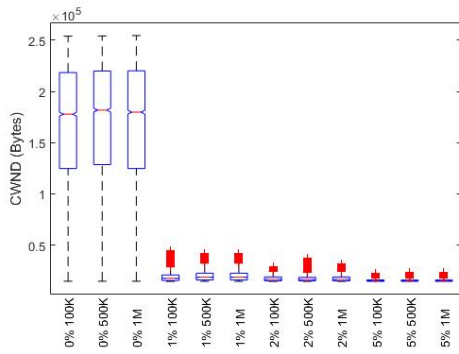
Para ambos parámetros se observa que no existe variación respecto de la distancia entre el usuario y la estación base.



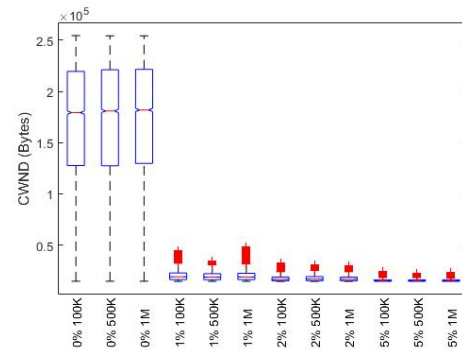
(a) CWND: 10Mbps y 10m entre UE y BS



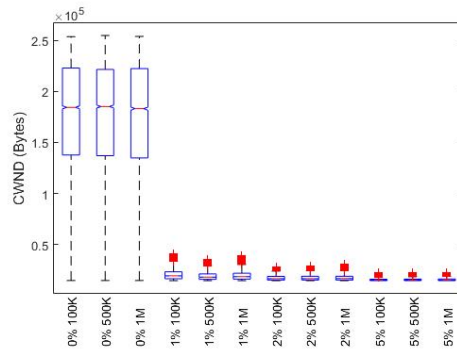
(b) CWND: 10Mbps y 20m entre UE y BS



(c) CWND: 10Mbps y 30m entre UE y BS

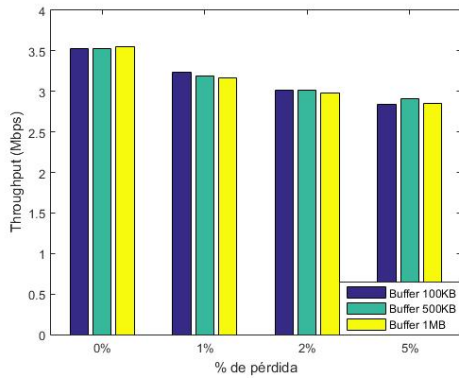


(d) CWND: 10Mbps y 40m entre UE y BS

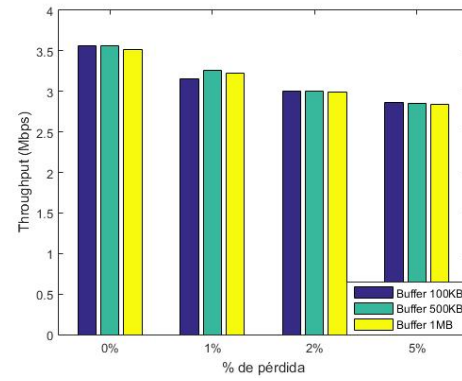


(e) CWND: 10Mbps y 50m entre UE y BS

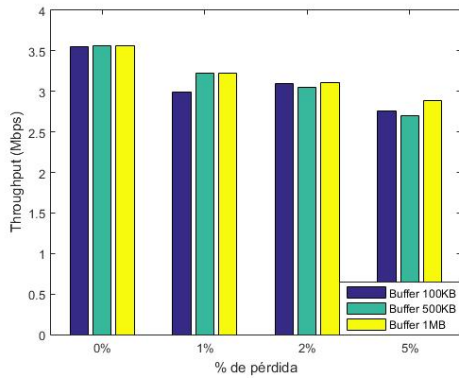
Figura 5.7: Red mmWave: CWND para 10Mbps



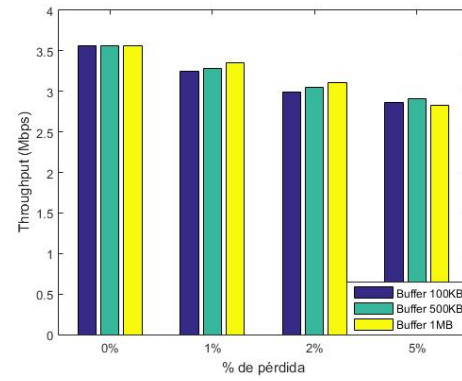
(a) Tasa de datos de 10Mbps y 10m entre UE y BS



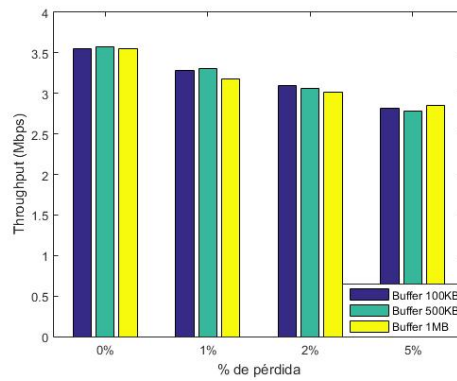
(b) Tasa de datos de 10Mbps y 20m entre UE y BS



(c) Tasa de datos de 10Mbps y 30m entre UE y BS



(d) Tasa de datos de 10Mbps y 40m entre UE y BS



(e) Tasa de datos de 10Mbps y 50m entre UE y BS

Figura 5.8: Red mmWave: Tasa de datos de 10Mbps

A continuación, se va a realizar el análisis de la evolución de la ventana de congestión y del rendimiento para la tasa de 50Mbps.

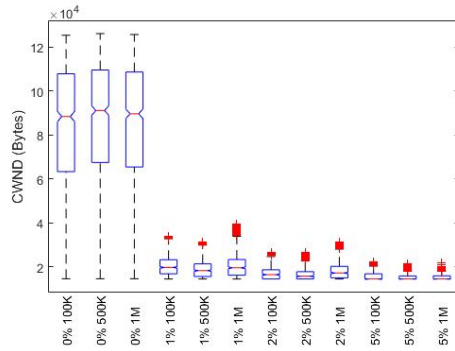
Se puede observar cómo en la Figura 5.9 el valor de la ventana de congestión que se alcanza para el 0 % de pérdida y para la tasa de datos de 50 Mbps es muy inferior al obtenido para este mismo porcentaje y para 10 Mbps. En este caso el valor oscila entorno a los  $12 \times 10^4$  Bytes mientras que para 10 Mbps se lograban  $2,5 \times 10^5$  Bytes. Del mismo modo que para 10 Mbps la ventana de congestión no aumenta para los demás porcentajes de pérdida, para 50 Mbps sucede el mismo hecho.

Además, en la evolución de la ventana de congestión no interviene la distancia entre el usuario y la estación base. Esta solo depende de la tasa de datos y del porcentaje de pérdida.

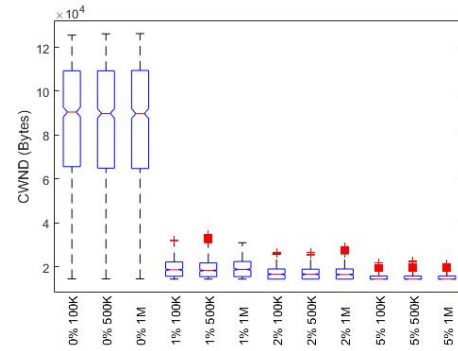
A diferencia de la ventana de congestión, el rendimiento aumenta respecto al obtenido para la tasa de datos de 10 Mbps. En la Figura 5.10 se observa cómo, para 50 Mbps, este parámetro alcanza prácticamente los 4.5 Mbps para un porcentaje de pérdida del 0 %.

En la Figura 5.10a, en la cual la distancia es de 10 metros, se observa cómo el rendimiento es superior para tamaño de buffer de 100 KBytes. Esto se debe a que para una distancia tan pequeña no se llega a producir saturación en el buffer.

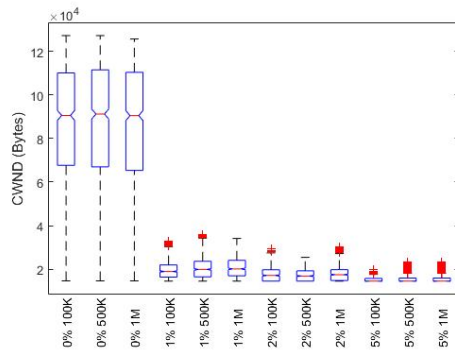




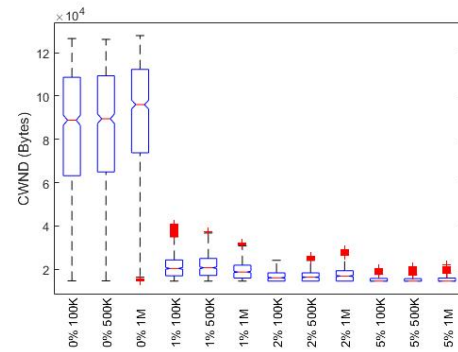
(a) CWND: 50Mbps y 10m entre UE y BS



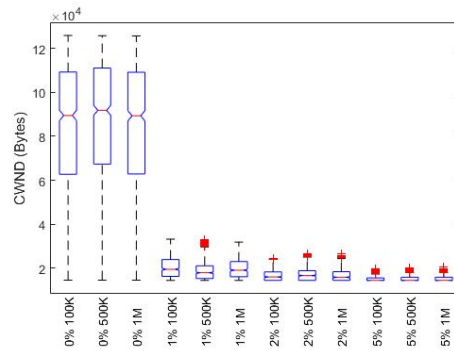
(b) CWND: 50Mbps y 20m entre UE y BS



(c) CWND: 50Mbps y 30m entre UE y BS

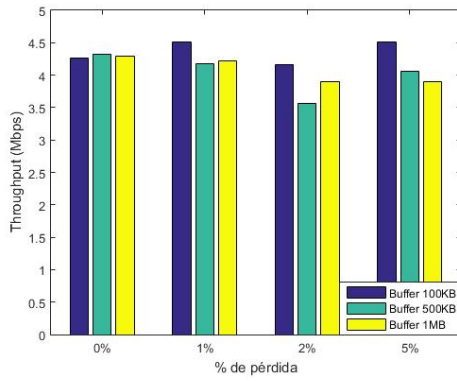


(d) CWND: 50Mbps y 40m entre UE y BS

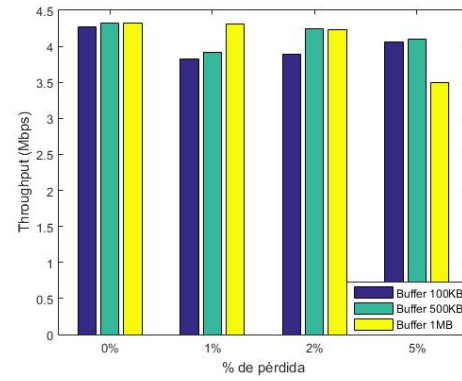


(e) CWND: 50Mbps y 50m entre UE y BS

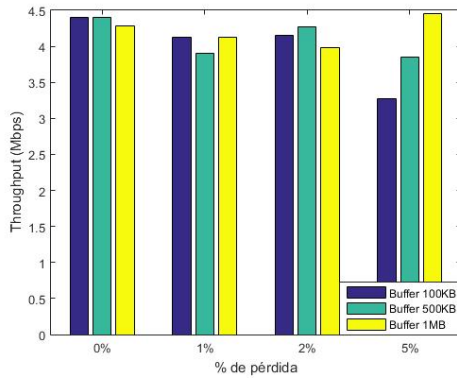
Figura 5.9: Red mmWave: CWND para 50Mbps



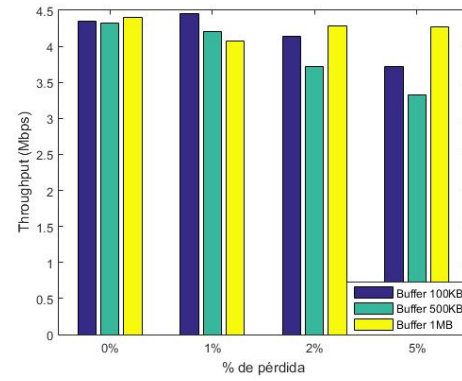
(a) Tasa de datos de 50Mbps y 10m entre UE y BS



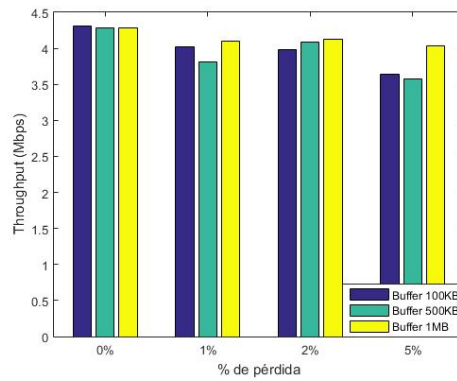
(b) Tasa de datos de 50Mbps y 20m entre UE y BS



(c) Tasa de datos de 50Mbps y 30m entre UE y BS



(d) Tasa de datos de 50Mbps y 40m entre UE y BS



(e) Tasa de datos de 50Mbps y 50m entre UE y BS

Figura 5.10: Red mmWave: Tasa de datos de 50Mbps

A continuación los parámetros a analizar son: el número de bytes perdidos y el valor RTT. Del mismo modo que se ha hecho anteriormente, primero se van a analizar los parámetros para la tasa de datos de 10 Mbps y después para 50 Mbps.

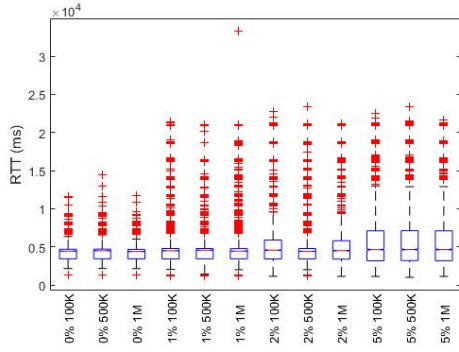
Tal como se muestra en la Figura 5.11, el parámetro RTT depende principalmente del porcentaje de pérdida. Para porcentajes de pérdida superiores aumenta la probabilidad de que se pierda un paquete, y debido a este hecho, no se llegue a recibir su correspondiente confirmación.

Para esta tasa de datos el número de bytes perdidos mostrados en la Figura 5.12 es mínimo, solo en algún caso puntual se pierden Bytes. Esto se debe a que a 10 Mbps los buffers, aunque sean de 100 KBytes, no se saturan y por lo tanto, no se produce la pérdida de ningún paquete debido a este hecho.

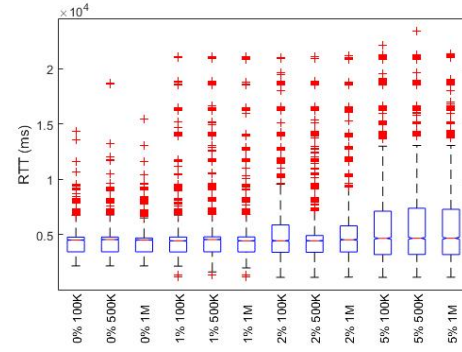
Del mismo modo que sucede en la Figura 5.11 con tasa de 10 Mbps, en la Figura 5.13, correspondiente a 50 Mbps, el aumento del valor de este parámetro sigue el mismo proceso. Por lo tanto, para un mayor porcentaje de pérdida, el parámetro RTT alcanza valores superiores.

Cabe destacar que para la tasa de datos de 10 Mbps el tiempo que se tarda en enviar un paquete y en recibir su confirmación es inferior al que se tarda con una tasa de datos de 50 Mbps. Esto se debe a que al aumentar la tasa de datos la probabilidad de saturar el canal, y por lo tanto, de perder paquetes, es superior.

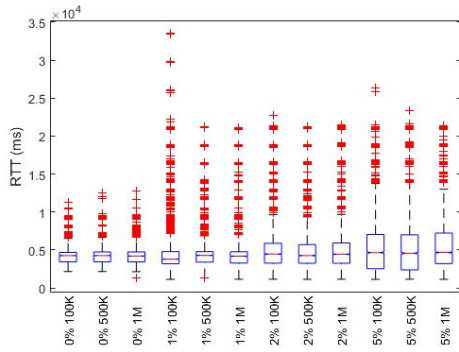
En el caso de la tasa de datos de 10 Mbps los bytes perdidos eran mínimos, en cambio, tal como se muestra en la Figura 5.14, a 50 Mbps y con un porcentaje de pérdida del 5 % se aprecia un aumento del número de paquetes perdidos. En concreto se pierde de media 1 paquete para este porcentaje de pérdida. Esto se debe a que para el 5 % de pérdida a una tasa de datos de 50 Mbps, la cual es superior a la del primer caso, el buffer sí se satura.



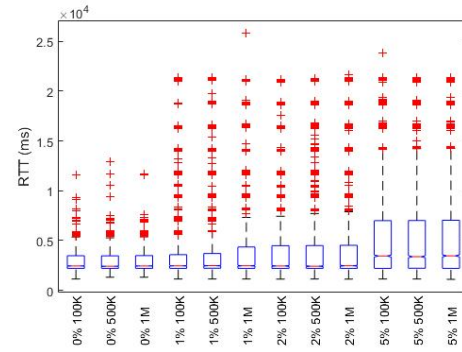
(a) RTT: 10Mbps y 10m entre UE y BS



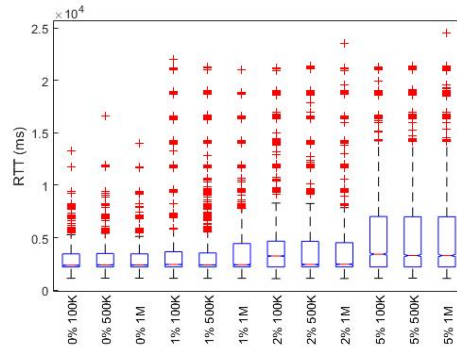
(b) RTT: 10Mbps y 20m entre UE y BS



(c) RTT: 10Mbps y 30m entre UE y BS

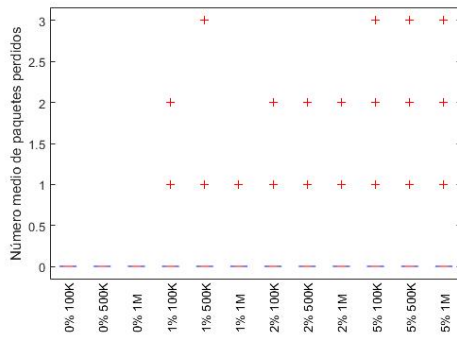


(d) RTT: 10Mbps y 40m entre UE y BS

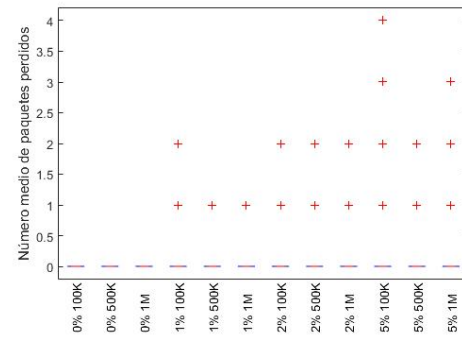


(e) RTT: 10Mbps y 50m entre UE y BS

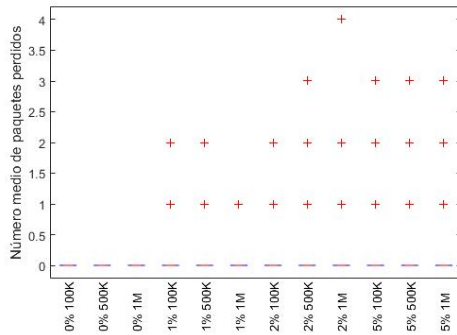
Figura 5.11: Red mmWave: RTT para 10Mbps



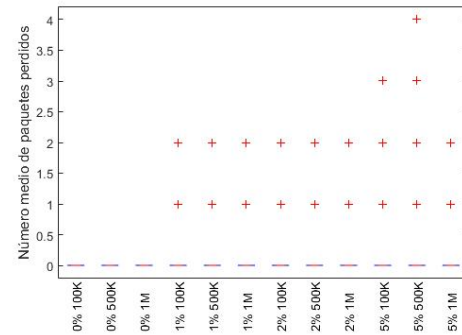
(a) Bytes perdidos: 10Mbps y 10m entre UE y BS



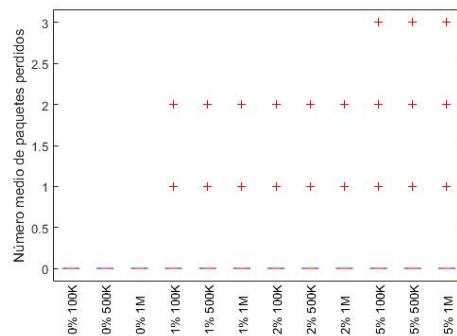
(b) Bytes perdidos: 10Mbps y 20m entre UE y BS



(c) Bytes perdidos: 10Mbps y 30m entre UE y BS

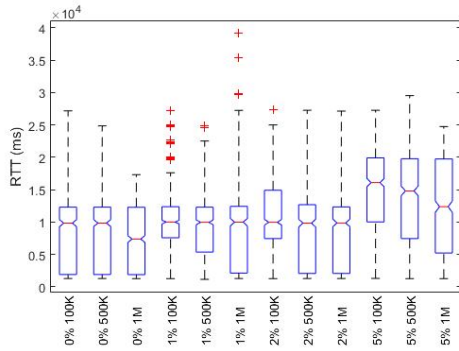


(d) Bytes perdidos: 10Mbps y 40m entre UE y BS

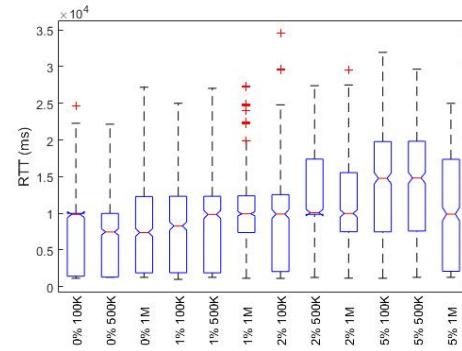


(e) Bytes perdidos: 10Mbps y 50m entre UE y BS

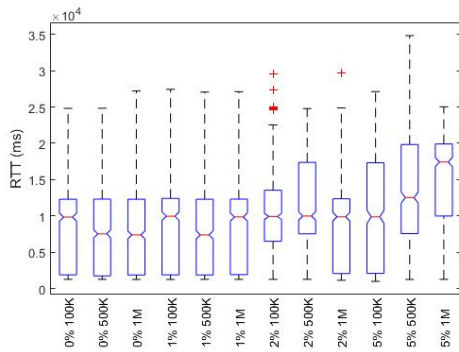
Figura 5.12: Red mmWave: bytes perdidos para 10Mbps



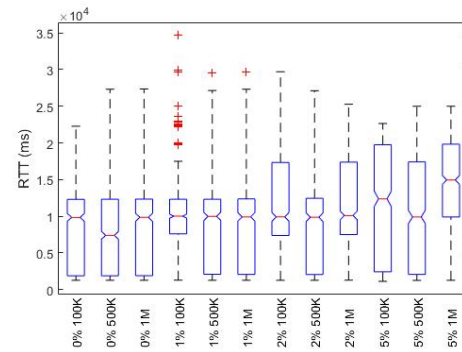
(a) RTT: 50Mbps y 10m entre UE y BS



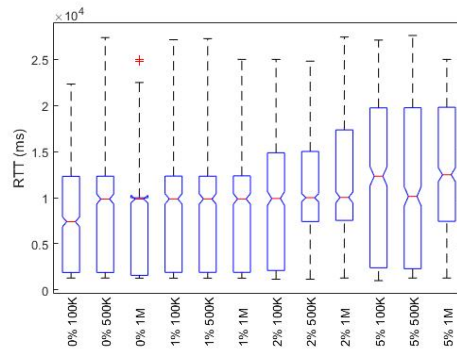
(b) RTT: 50Mbps y 20m entre UE y BS



(c) RTT: 50Mbps y 30m entre UE y BS

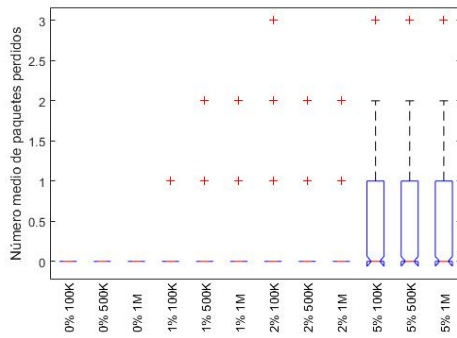


(d) RTT: 50Mbps y 40m entre UE y BS

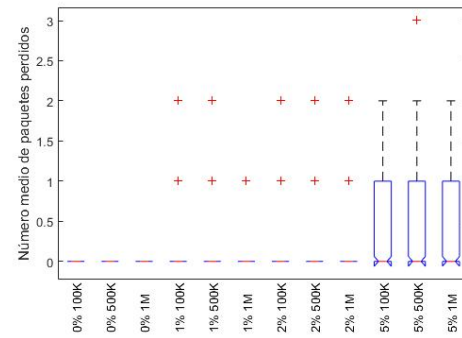


(e) RTT: 50Mbps y 50m entre UE y BS

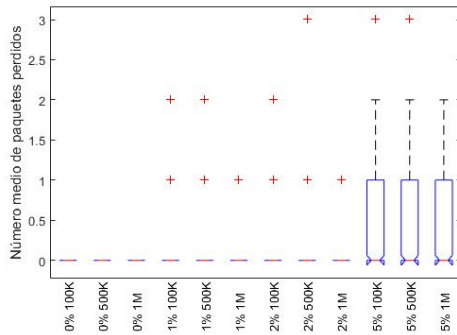
Figura 5.13: Red mmWave: RTT para 50Mbps



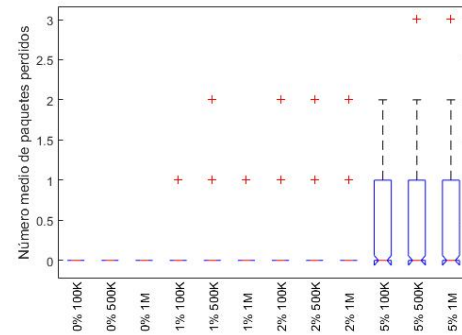
(a) Bytes perdidos: 50Mbps y 10m entre UE y BS



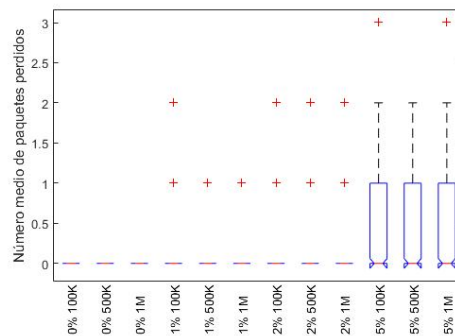
(b) Bytes perdidos: 50Mbps y 20m entre UE y BS



(c) Bytes perdidos: 50Mbps y 30m entre UE y BS



(d) Bytes perdidos: 50Mbps y 40m entre UE y BS



(e) Bytes perdidos: 50Mbps y 50m entre UE y BS

Figura 5.14: Red mmWave: bytes perdidos para 50Mbps

# Capítulo 6

## Conclusión

Mediante este trabajo se ha desarrollado un entorno para la evaluación sistemática de algoritmos de control de congestión en redes 5G sobre canales mmWave.

A lo largo del trabajo se han utilizado diferentes herramientas para lograr el desarrollo de dicho escenario. En primer lugar, para lograr un canal mmWave, ha sido necesario recrear una comunicación entre un usuario y una estación base con las características de este tipo de tecnología. Para ello se ha utilizado el simulador NS-3 a través del cual se han obtenido trazas que posteriormente han sido utilizadas para la generación de un canal mmWave. En segundo lugar, utilizando la herramienta MahiMahi se han emulado dos tipos de redes introduciendo trazas en esta. Para obtener redes celulares se han utilizado trazas de operadores, como ATT y Verizon, las cuales están incluidas en la propia herramienta. En cambio, para las redes mmWave se han utilizado las trazas obtenidas en el simulador NS-3. Finalmente se ha utilizado la herramienta CCP la cual modifica dinámicamente la ventana de congestión, basándose en el algoritmo de control de congestión que haya sido incluido, en este caso se ha utilizado el algoritmo AIMD.

Entre los resultados obtenidos se encuentran los pertenecientes a las trazas generadas por el simulador NS-3. Para caracterizar la red mmWave nos hemos centrado en el análisis de tres parámetros: SINR, MCS y número de bits recibidos por milisegundo. Para distancias entre el usuario y la estación base menores de 20 metros la calidad de la señal es excelente, con una tasa de datos máxima. Para estas distancias el parámetro SINR toma valores superiores a 20 dB y el índice MCS, que indica la cantidad de datos que se pueden enviar a la vez, alcanza el valor 27, lo cual se corresponde con una 64 QAM. Por lo tanto, se ha podido observar cómo el número de bits que se reciben para estas distancias es máximo y constante. En cambio, para distancias superiores, la calidad de la señal desciende drásticamente. La SINR oscila entre 0 y 13 dB y el índice MCS entre 4 y 14, por lo tanto el número de bits que se reciben varía constantemente.

Una vez se han emulado los dos tipos de redes, celular y mmWave, y se ha introducido el algoritmo de control de congestión que se quiere evaluar en el CCP, se inicia una comunicación entre cliente y servidor de la cual se obtienen los resultados finales. En concreto, estos resultados constan de parámetros como: la ventana de congestión, el rendimiento medio y el número de paquetes perdidos.



La evolución de la ventana de congestión sigue el mismo patrón para ambos tipos de redes. El valor pico,  $3 \times 10^5$  Bytes, para la red celular se obtiene con un porcentaje de pérdida del 0 % y con una tasa de datos de 10 Mbps. En el caso de la red mmWave, el valor pico,  $2 \times 10^5$  Bytes, se logra con el mismo porcentaje de pérdida y la misma tasa de datos que en la red celular.

El rendimiento medio obtenido para ambas redes depende principalmente del tamaño del buffer, del porcentaje de pérdida y de la tasa de datos. Para los dos tipos de redes, su valor máximo, 4.5 Mbps, se alcanza cuando el porcentaje de pérdida es del 0 %, el buffer es del 1 MByte y la tasa de datos 50 Mbps. En ambos casos el rendimiento disminuye al aumentar el porcentaje de pérdida o disminuir la tasa de datos.

En cambio, si se habla del número de paquetes perdidos, el resultado no sigue el mismo patrón para los distintos tipos de redes. En la red celular, con un porcentaje de pérdida del 5 %, aumenta el número de paquetes que se pierden para cualquier tasa de datos. En cambio, para la red mmWave, este aumento solo sucede para la tasa de datos de 50 Mbps, ya que para 10 Mbps se pierden paquetes de manera puntual porque el buffer no sufre saturación.

Tras este análisis se puede ver como el funcionamiento del algoritmo de control de congestión AIMD es el esperado. Además, también se puede observar cómo para una red basada en mmWave el funcionamiento de este algoritmo no es óptimo. Gracias a este escenario se pueden realizar comprobaciones de distintos algoritmos de control de congestión y validar su funcionamiento para una red 5G sobre canales mmWave.

# Bibliografía

- [1] Niu Yong, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, and Athanasios V Vasilakos. A survey of millimeter wave communications (mmwave) for 5g: opportunities and challenges. *Wireless Networks*, 21(8):2657–2676, 2015.
- [2] Cardwell, Neal, Cheng, Yuchung, C. Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, and Van Jacobson. BBR: Congestion-Based Congestion Control. *Queue*, 14(5):50:20–50:53, October 2016.
- [3] M.Benisha, R.Thandaiah Prabu, and Thulasi Bai. Evolution of mobile generation technology. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7, february 2019.
- [4] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). 3gpp tr 21.915 v15.0.0. september 2019.
- [5] Theodore S. Rappaport, Shu Sun, Student Member, and Mansoor Shafi andLife Fellow. 5g channel model with improved accuracy and efficiency in mmwave bands. *IEEE 5G Tech Focus*, 1(1), March 2017.
- [6] Saeed Javidmehr and DVTEST Inc. La tecnología 5g requiere las frecuencias de ondas milimétricas / mmwave. *DVTEST Cámaras de pruebas anecoideas de RF portátiles, DC-90 GHz*.
- [7] M. Zhang, M. Polese, M. Mezzavilla, J. Zhu, S. Rangan, S. Panwar, and a. M. Zorzi. Will tcp work in mmwave 5g cellular networks? *IEEE Communications Magazine*, 57(1):65–71, January 2019.
- [8] M. Zhang, M. Mezzavilla, R. Ford, S. Rangan, S. Panwar, E. Mellios, D. Kong, A. Nix, and M. Zorzi. Transport layer performance in 5g mmwave cellular. In *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 730–735, April 2016.
- [9] M. Mezzavilla, M. Zhang, M. Polese, R. Ford, S. Dutta, S. Rangan, and M. Zorzi. End-to-end simulation of 5g mmwave networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(3):2237–2263, thirdquarter 2018.
- [10] Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya. January 2014.
- [11] Akshay Narayan, Frank Cangialosi, Deepti Raghavan, Prateesh Goyal, Srinivas Narayana, Radhika Mittal, Mohammad Alizadeh, and Hari Balakrishnan. Restructuring endpoint congestion control. page 30–43, 2018.

- 
- [12] Ravi Netravali, Anirudh Sivaraman, Somak Das, Ameesh Goyal, Keith Winstein, James Mickens, and Hari Balakrishnan. Mahimahi: Accurate record-and-replay for HTTP. In *2015 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 15)*, pages 417–429, Santa Clara, CA, July 2015. USENIX Association.